annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 1

inra

AAG
29.1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 29 (1) 1-110 (1978)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : R. FÉVRIER

Directeur général adjoint : J. POLY

Inspecteurs généraux : R. BOUCHET, P. BOUVAREL, C. CALET, A. CAUDERON, G. FAUCONNEAU, G. JOLIVET, R. PÉRO.

Rédaction des Annales

Pour l'ensemble des Séries : J. POLY

Annales agronomiques.

— J. CHAUSSIDON, Chef du Département de Science du sol, C. N. R. A.
— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— M. HALLAIRE, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— J. PONCHET, Chef du Département de Pathologie végétale, 06602 Antibes.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie,

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès. Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales d'Hydrobiologie.

— J. LECOMTE, Chef du Département d'Hydrobiologie, C. N. R. A.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie. Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (1), 1-36.

Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique

G. VACHAUD, C. DANCETTE *, S. SONKO ** et J. L. THONY

Institut de Mécanique, Laboratoire Associé au CNRS, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, B.P. 53, 38041 Grenoble Cedex

* *Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (IRAT) détaché à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, Division de Bioclimatologie, C.R.A., Bambey, République du Sénégal*

** *Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Station de Richard-Toll, République du Sénégal*

Résumé

On présente deux méthodologies destinées à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol non saturé par mesure directe *in situ*. La première méthode, dite du « drainage interne », revient à suivre le ressuyage d'un sol après infiltration d'une lame d'eau, sans évaporation. La deuxième méthode dite du « bilan », est basée sur le suivi de l'évolution du stock d'eau dans le sol en période d'évaporation naturelle après humidification par des pluies. Les deux méthodes reposent sur l'utilisation simultanée d'une sonde neutron et d'une série de tensiomètres, et sur l'analyse des mesures. Elles ont été appliquées sur deux types de sol caractéristiques du Sénégal : un sol sableux dunaire, et un sol de dépôt éolien. Dans la dernière partie de l'article, on insiste sur l'intérêt offert par la connaissance de ces grandeurs en présentant une méthode de calcul de la recharge des réserves profondes durant une période de 18 mois. Cette recharge peut représenter jusqu'à 30 p. 100 de la pluie (sur deux hivernages) au-delà de la cote 150 cm, sur une parcelle de sol nu sans végétation.

L'évolution des connaissances acquises durant les deux dernières décennies sur les transferts d'eau dans la zone de sol non saturée qui s'étend depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique a permis de mettre au point des méthodes de mesure afin de quantifier ces transferts, et de caractériser les propriétés physiques du sol influant sur la dynamique de l'eau. On a pu également, depuis quelques années, grâce au grand développement qu'ont connu les méthodes de calcul numérique, définir des codes qui devraient permettre d'estimer rapidement (sans expérimentation « lourde »), à tout moment et pour un type de sol caractérisé par ses propriétés hydrodynamiques, les pertes d'eau probables par évaporation et par percolation, et l'évolution des réserves hydriques disponibles, pour des conditions climatiques données. A partir de ces codes on peut espérer reconstituer l'évolution du bilan hydrique au cours des

années passées à partir des données climatiques acquises (pluviométrie notamment) et opérer des projections à différents seuils de probabilité pour les années à venir (option à prendre en vue d'une politique rationnelle de l'eau).

Devant l'acuité des problèmes posés par la gestion des réserves en eau stockées dans cette zone de sol en vue de leur utilisation optimale par les cultures, l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles a mis l'accent, ces dernières années, sur un programme intensif d'étude de caractérisation des sols du point de vue hydrique et hydrodynamique. Ce programme a été élaboré en collaboration étroite avec, entre autres, l'Institut de Mécanique de Grenoble (Laboratoire Associé au CNRS) et avec l'aide de l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (Vienne) qui est notamment intervenue pour la fourniture de matériel, et le financement d'interventions d'appui. Il se propose, à partir de la connaissance des facteurs climatiques, de la caractérisation hydrodynamique des sols, et de la détermination des exigences hydriques des principales cultures :

- de préconiser par zone homogène d'une part le matériel végétal le mieux adapté et d'autre part les meilleures dates d'intervention culturale ;
- de définir les techniques de travail et d'entretien du sol les plus appropriées à une gestion efficace des réserves hydriques ;
- de contrôler l'efficacité des techniques culturales proposées en régime pluvial.

Les résultats que nous présentons dans cet article s'insèrent entièrement dans le cadre de ce projet. Nous nous attacherons essentiellement à définir la méthodologie qui a été utilisée pour caractériser le rôle du sol dans les transferts, en insistant ensuite sur les possibilités ainsi offertes pour mieux définir les diverses composantes du bilan.

I. — Variables de base et équation des transferts en milieu non saturé

Si dans un premier temps, et dans un but de simplification, on ne considère que le transfert d'eau dans un milieu inerte et rigide, en condition isotherme, les deux grandeurs essentielles intervenant dans le mécanisme de l'écoulement sont :

— la teneur en eau volumique θ, définie comme le volume d'eau présent dans un volume unitaire de sol ;

— la pression effective de l'eau h, définie comme la différence entre la pression de l'eau dans le sol et la pression atmosphérique, et exprimée en terme de hauteur d'eau.

La mesure des variations de teneur en eau permet de déterminer la grandeur des volumes écoulés alors que la mesure des pressions donne une information fondamentale sur la direction des écoulements.

La pression effective de l'eau dans un élément de volume non saturé caractérise en effet l'influence simultanée des effets capillaires et des phénomènes de liaison entre l'eau et la phase solide. Elle dépend essentiellement de la teneur en eau θ ; c'est la grandeur communément appelée « succion ». Puisque l'eau du sol est sous tension, h est une grandeur *négative*. La courbe $h(\theta)$ définit essentiellement l'énergie qu'il faut développer pour amener un volume de sol à une certaine humidité. On sait que pour un sol donné, cette relation n'est pas univoque, mais dépend, comme nous le verrons

par la suite, du sens d'évolution des teneurs en eau, ce qui se traduit par l'hystérésis intervenant dans la relation h-θ (Vachaud et Thony, 1970).

Si l'on définit la position d'un élément de volume dans le champ de pesanteur par sa distance z à la surface du sol, l'axe Oz étant orienté positivement vers le bas et l'origine des cotes étant prise à la surface, on peut introduire la notion d'énergie potentielle par unité de poids, ou de *charge hydraulique* H sous la forme :

$$H = h - z . \tag{1}$$

Cette notion est très importante ; en effet pour qu'un système soit en équilibre il suffit que l'énergie potentielle (ou la charge hydraulique) soit partout identique ; corrélativement toute variation d'énergie entre deux points entraîne nécessairement un écoulement du point de plus forte énergie vers le point de plus faible énergie. La détermination d'un profil de charge permet donc d'avoir directement la direction de l'écoulement.

Les quantités d'eau s'écoulant sous l'effet d'une différence de charge entre deux points peuvent être obtenues par la loi de Darcy généralisée. Si l'on suppose que les transferts dans la zone non saturée ont essentiellement lieu dans la direction verticale, cette loi s'écrit sous la forme :

$$q = - K(\theta) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta z} \tag{2}$$

où :

$K(\theta)$ est la conductivité hydraulique qui dépend très fortement de la teneur en eau du sol ;

$\frac{\Delta H}{\Delta z}$ est le gradient de charge entre deux sections distantes de Δz ;

q est la vitesse de Darcy, ou flux volumique.

Il faut enfin considérer l'équation de conservation de masse. Pour un volume de sol d'épaisseur Δz, de section unité, on écrit que durant un instant Δt la différence entre la masse d'eau entrant par une face et la masse d'eau sortant par une autre face ne peut être due qu'à la variation de masse d'eau comprise dans ce volume s'il n'y a ni source, ni puits.

Dans le cas d'un écoulement vers le bas, cette formulation donne :

$$\rho_w \cdot (q_1 - q_2) \cdot \Delta t = \rho_w \cdot \Delta\theta \cdot \Delta z \cdot 1$$

où

q_1 : flux entrant par la face supérieure,
q_2 : flux sortant par la face inférieure,
ρ_w : masse volumique de l'eau

ou

$$(q_2 - q_1) = - \frac{\Delta\theta \cdot \Delta z}{\Delta t} . \tag{3}$$

La grandeur $(\Delta\theta \cdot \Delta z)$ est généralement définie comme la *variation de stock* ΔS dans la tranche de sol d'épaisseur Δz.

Cette dernière formule montre clairement qu'il n'est pas possible d'obtenir le flux à travers une des faces, ou le volume d'eau écoulé $q \cdot \Delta t$ par surface unitaire de sol, à partir de la simple mesure de variation de stock dans l'élément de volume pris en

compte. Il faut de plus déterminer le flux entrant, ou sortant du volume considéré par l'autre face, soit en appliquant la formule (2) si l'on connaît dans cette section la conductivité hydraulique et le gradient, soit en fixant la cote de cette face à une profondeur où l'on connaît le flux.

Les deux relations importantes qui nous permettent de caractériser la dynamique de l'eau dans un sol sont donc :

— d'une part la relation $h(\theta)$ qui permet de définir l'énergie interne de pression dans un volume de sol ;

— d'autre part, la relation $K(\theta)$ qui permet de connaître avec quelle facilité l'eau s'écoulera à la suite d'une variation d'humidité (provenant d'un apport d'eau, ou d'une extraction d'eau) entre deux tranches de sol.

Le matériel et la méthodologie décrits par la suite permettent d'obtenir directement *in situ* ces deux relations. Cette méthodologie se basant sur les développements qui viennent d'être faits, il est bon de revenir sur la validité des hypothèses simplificatrices qui ont été adoptées au début de ce chapitre. L'hypothèse la plus contraignante concerne la rigidité du milieu. Les expériences effectuées par Smiles (1974) au CSIRO à Canberra, en Australie, sur les argiles gonflantes montrent clairement que les équations (2) et (3) ne s'appliquent pas pour ces matériaux, et que la notion de teneur en eau n'a pas de sens dans ce cas. Pour cette raison, nous travaillerons avec des sols de types sableux, qui sont très largement représentatifs au Sénégal. Les résultats obtenus récemment sur les problèmes de thermomigration montrent que l'hypothèse de milieu isotherme est beaucoup moins contraignante puisque les transferts d'eau induits par des gradients thermiques (ce qui n'est pas pris en compte dans l'analyse précédente) sont au moins d'un ordre de grandeur plus faible que les transferts sous l'effet de gradient de charge hydraulique, et sont de toute façon du même ordre de grandeur que les erreurs expérimentales. Il en est de même pour les transferts sous gradients osmotiques. Une condition draconnienne reste finalement l'hypothèse que l'air contenu dans les pores est à la pression atmosphérique (Morel-Seytoux, 1973 ; Vachaud, Gaudet et Kuraz, 1974).

Si suffisamment de précautions sont prises pour que cette dernière hypothèse soit justifiée, en évitant notamment une submersion trop importante, on peut en général estimer que les équations (2) et (3) sont représentatives de la physique des transferts, à condition bien sûr que l'écoulement soit *vertical*. L'application de ces équations à l'analyse d'essais d'infiltration réalisés sur anneaux (essai de Müntz) est ainsi toujours problématique, même si l'anneau de garde est important.

Deux livres assez récents donnent une bonne synthèse des connaissances actuelles sur les écoulements en milieu non saturé : celui édité par D. R. Nielsen (1972) et celui de D. Hillel (1973).

2. — Caractérisation des sites d'essais

Afin d'obtenir des résultats pouvant avoir une application importante, des essais ont été effectués sur deux types de sols représentatifs de deux grandes zones faisant actuellement l'objet d'essais de valorisation agricole au Sénégal :

— le sol Dior, qui est un sol très répandu dans les zones centre et centre Nord du Sénégal, et qui fait essentiellement l'objet de la culture pluviale du mil et surtout de l'arachide ;

— le sol Dieri, qui est un sol dunaire représentatif du massif issu de l'erg Ogolien ceinturant le lit majeur du fleuve Sénégal dans ses parties aval et deltaïque. Traditionnellement, et dans la limite d'une pluviométrie souvent trop faible, ce sol est cultivé en mil ou en niebé, ou est laissé en friche. On envisage d'y pratiquer aussi l'irrigation car il ne présente ni l'hydromorphie ni l'halomorphie des sols alluviaux du delta ou de la basse vallée du Sénégal.

a) *Essais sur sol Dior*

Les sols Dior sont des sols ferrugineux tropicaux, selon la classification française des sols, formés à partir de matériaux sableux quaternaires d'origine complexe (fluviale, marine et éolienne) (Pieri, 1975). Leur profondeur est généralement grande pouvant dépasser 4 à 5 m ; ces sols sont relativement homogènes horizontalement et verticalement, bien qu'il faille se méfier des zones de termitière et d'inclusions provenant souvent d'un habitat ancien, où les caractéristiques physico-chimiques sont très différentes.

Ces sols sont exempts de cailloux et de gravier. Ils contiennent plus de 90 p. 100 de sables dont les 3/4 de sable fin. Une analyse granulométrique de l'horizon de surface indique :

- 0,4 p. 100 de matière organique ;
- 2 p. 100 d'argile (essentiellement kaolinite non gonflante) ;
- 5,6 p. 100 de limon ;
- 69 p. 100 de sables fins ;
- 23 p. 100 de sables grossiers.

En profondeur, on peut trouver un peu plus d'argile et de limon.

La densité apparente de ces sols est toujours élevée (souvent supérieure à 1,6) ; leur porosité totale faible (environ 0,4) rend nécessaire le travail du sol sur une quinzaine de cm, ce qui fait alors descendre la densité apparente dans l'horizon cultivé à environ 1,45 (soit une porosité de 0,45) (Charreau et Nicou, 1971).

Du point de vue hydrodynamique enfin, ces sols ont une perméabilité réputée assez élevée, qui peut dans certains cas, être réduite par dispersion de la faible quantité d'argile. Les diverses méthodes de mesure globales classiques (Porchet, Müntz, cases lysimétriques) ont donné des résultats très variables ; entre 50 et 250 mm/h pour la perméabilité à saturation (Charreau, 1963). Les caractéristiques classiques du point de vue agronomique correspondent à une capacité de rétention (après 2 ou 3 jours de ressuyage suivant une forte pluie ou un gros arrosage) variant entre 0,09 et 0,14 cm^3/cm^3, et une humidité au pF 4,2 comprise entre 0,03 et 0,05 cm^3/cm^3. On peut enfin généralement compter sur une réserve d'eau utilisable de 80 à 90 mm sur le premier mètre (Dancette, 1970).

Ces sols ont été intensivement étudiés au Centre de Recherches Agronomiques de Bambey ; on ne disposait pas jusqu'alors de mesures permettant de caractériser les variations de conductivité hydraulique avec la teneur en eau du sol, ni la courbe de succion. Nous avons été amené à équiper deux sites de mesures sur le CRA de Bambey, pour déterminer ces courbes caractéristiques selon deux méthodes différentes.

Le premier site (B1) a été installé en 1974. Une fosse pédologique creusée jusqu'à la profondeur de 1,50 m à proximité de la zone d'essai a permis de constater un profil apparemment très homogène.

Un second site (B2) installé fin 1975 à 50 m au sud-ouest du premier correspond à un profil moins homogène, avec notamment présence d'un horizon d'accumulation très riche en matière organique, et très humide, d'environ 5 cm d'épaisseur à la côte 105 avec un pendage de 10° dans la direction est-ouest.

Considérant la répartition en éléments fins $< 20\ \mu$, on notera sur le site B1 une augmentation régulière des particules fines (de 6 à 13,5 p. 100) dans les premiers 60 cm. Au-delà, la proportion est plus faible et se maintient constante (environ 11 p. 100).

Sur le site B2, la proportion de particules fines est nettement plus faible jusqu'à 80 cm (environ 8 p. 100). L'horizon d'accumulation à 90 cm présente un taux de ces dernières bien plus élevé (13,5 p. 100). Au-delà, leur proportion décroît légèrement pour arriver aux mêmes valeurs que sur le site B1 au voisinage de la cote $z = 150$ cm.

b) *Essais sur sol Dieri*

Les sols Dieri ont moins été étudiés que les sols Dior, et le nombre d'informations dont nous disposons est beaucoup plus réduit.

Ce sont des sols sableux, d'origine éolienne, classés d'après la classification française en sol brun subaride sur sable éolien.

Ces sols profonds (2 m au moins) et très homogènes, présentent les caractéristiques texturales suivantes :

- 1,2 à 1,6 p. 100 d'argile de type kaolinite ;
- 0,8 à 1 p. 100 de limon fin ;
- 2 p. 100 de sable très fin ou limon grossier ;
- 70 à 75 p. 100 de sables fins ;
- 20 à 25 p. 100 de sables grossiers.

Le pourcentage élevé de sables en fait un sol bien plus perméable que le Dior.

La densité apparente en place varie de 1,45 en surface à 1,5 en profondeur, la porosité texturale y étant élevée, Aucune information n'était disponible, avant nos essais, sur les caractéristiques hydrodynamiques de ces sols.

Un site d'essai a été aménagé à N'Diol, près de la station de Richard Toll. Ce site a été installé en 1976, dans une zone de très grande homogénéité.

3. — Méthode de mesure

La méthodologie utilisée pour obtenir les relations $h(\theta)$ et $K(\theta)$ repose sur la mesure simultanée des variations d'humidité et de charge hydraulique dans le profil de sol, soit dans des conditions de ressuyage contrôlé après un apport d'eau important ou « méthode du drainage interne », soit dans des conditions naturelles ou « méthode du bilan ». Elle exige l'utilisation de moyens de mesure fidèles, répétitifs et non destructifs de ces deux variables ; de ce fait les sites d'essais ont été équipés de tubages pour humidimètre à neutron et d'une série de tensiomètres.

a) *Mesure de la teneur en eau*

Elle est effectuée avec un humidimètre à neutrons. Nous n'entrerons pas dans la théorie des mesures neutroniques ni dans la description de l'appareillage (renvoyant

pour cela aux ouvrages spécialisés ainsi qu'à l'article récent de synthèse de Couchat (1977)).

Les humidimètres utilisés pour cette étude sont de type HP310 (assistance IAEA) et HP510 (assistance FAC) pour le site de Bambey, et SOLO (équipement ISRA pour le site de N'Diol).

Les courbes d'étalonnage ont été déterminées au champ par la méthode gravimétrique, et la courbe obtenue a été confirmée par la méthode d'étalonnage chimique de Couchat (1975) pour le site de Bambey. Sur ce dernier site, un étalonnage spécial a également été fait à la cote $z = 12$ cm pour corriger les effets de surface, en corrélant les comptages obtenus à cette cote avec la teneur en eau moyenne obtenue par gravimétrie dans la tranche 0-20 cm. La correction apportée s'avère importante dans le calcul des variations de stock, notamment lorsque le sol est très humide, les mesures d'humidité à 12 cm pouvant être sous-estimées de plusieurs points si aucune correction n'est faite (Daudet et Vachaud, 1977).

b) *Mesure de la charge hydraulique et de la direction des flux*

Le principe de la tensiométrie a été également largement développé dans la littérature de physique des sols. Rappelons simplement que si l'on considère une cellule poreuse de très fine porosité permettant d'assurer la continuité de la phase liquide entre un volume de sol à la cote z et un manomètre à mercure situé à la surface du sol (fig. 1), un calcul élémentaire d'hydrostatique montre qu'à l'équilibre, si h est la pression effective de l'eau dans le sol, la remontée de mercure dans le manomètre au-dessus d'un niveau de référence situé à la cote $z = 0$ vaut :

$$\zeta = -\frac{(h - z)}{12{,}6} = -\frac{H}{12{,}6} .$$

On notera que le terme 12,6 provient de la différence de masse volumique entre la colonne de mercure et la colonne d'eau équivalente déplacée par le mercure.

Si le niveau de référence du mercure est situé à une distance Y (cm) au-dessus de la surface du sol, il faut pour obtenir la charge par rapport à la surface du sol, corriger cette formule pour obtenir :

$$H = -12{,}6\,\zeta + Y .$$

On peut donc déterminer à tout instant la charge hydraulique à la cote d'implantation du tensiomètre par simple lecture du niveau du mercure dans le manomètre.

L'utilisation de plusieurs tensiomètres implantés à différentes cotes permet d'obtenir le profil de charge hydraulique dont la pente en tout point donnera, d'après l'équation (1) la direction des transferts.

Si l'on oriente positivement les vitesses selon la direction de l'axe Oz, on voit notamment, en admettant que l'écoulement est vertical, que l'on aura une zone d'écoulement descendant (flux positif) dans la région où le gradient est négatif (H diminue quand z augmente) ; une zone d'écoulement ascendant (flux négatif) quand le gradient est positif ; enfin dans toute section correspondant à un gradient nul (c'est-à-dire un maximum ou un minimum sur le profil H(z)), le flux sera nul. Ces trois configurations sont reportées figure 1, où l'on a dans un but pratique, choisi les mêmes échelles pour les axes de profondeur et de charge. Cette configuration sera toujours utilisée par la suite.

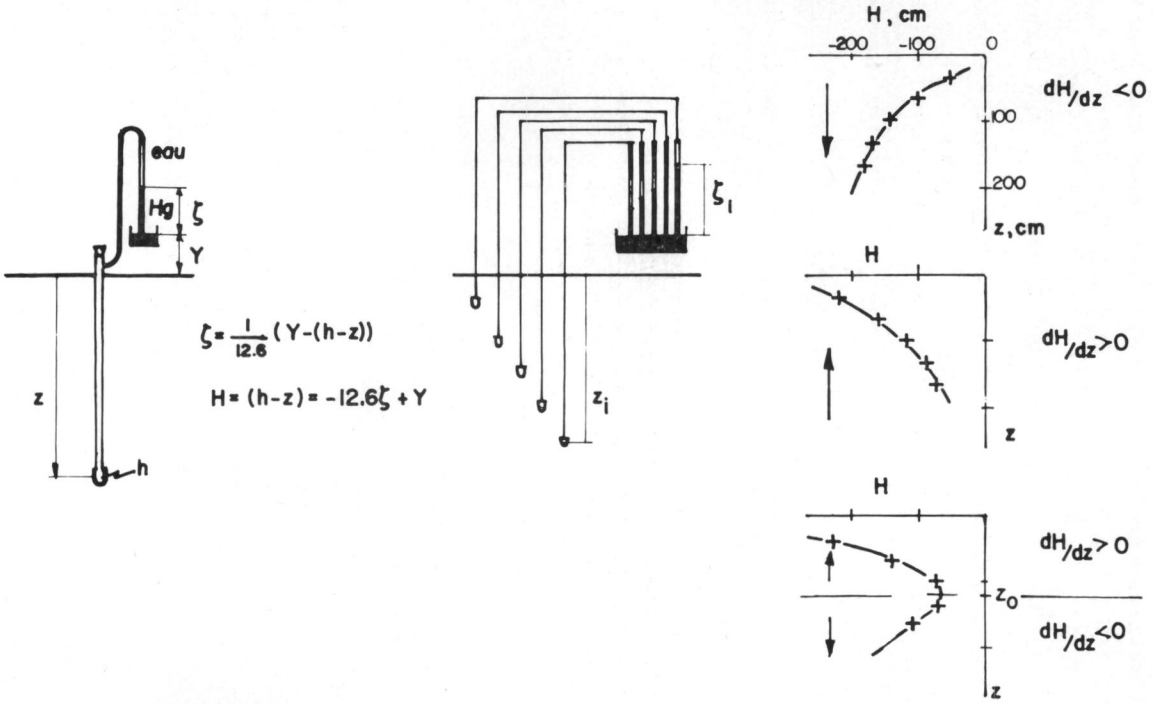


FIG. 1. — *Schéma de principe du fonctionnement d'un tensiomètre, et de la détermination de la direction des transferts.* H est la charge (en cm d'eau) par rapport à la surface du sol, correspondant à la pression h (cm d'eau) régnant dans le sol à la cote S. ζ est la remontée du mercure (en cm) par rapport à un niveau de référence située à la distance Y au-dessus de la surface du sol.

Deux systèmes différents de tensiomètres ont été utilisés :

— sur les deux sites de Bambey, quatre ensembles Soil Moisture réf. 2510, comportant chacun 5 anneaux en céramique poreuse, sur une canne unique, isolés et situés à différentes cotes, et un panneau de mesure avec 5 manomètres à mercure. Deux ensembles permettent de mesurer la charge à 10, 20, 30, 40 et 50 cm ; deux autres à 30, 60, 90, 120 et 150 cm ;

— sur le site de N'Diol, deux ensembles Soil Moisture réf. 2310, à cannes multiples de différentes longueurs, connectées à un panneau de mesure avec 5 manomètres à mercure. Les mesures de charge étaient dans ce cas effectuées à 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130 et 150 cm.

4. — Détermination de $K(\theta)$ et $h(\theta)$ par la méthode du drainage interne

a) *Principe de la méthode*

Cette méthode consiste à effectuer sur un site un apport d'eau important (équivalent à une lame d'au moins 200 mm) et à suivre la redistribution de l'eau dans le profil immédiatement après la disparition de la lame, en couvrant la surface du sol de façon à éviter tout transfert à travers cette surface. On impose ainsi que pendant toute la cinétique de ressuyage l'on ait $q = 0$ à travers la cote $z = 0$ (Hillel, 1972).

A l'aide des tensiomètres et de la sonde neutron on suit l'évolution des profils de charge et des profils d'humidité pendant ce ressuyage. Si l'on considère (fig. 2) deux profils hydriques mesurés au temps t' et t depuis la disparition de lame, en application de l'équation (3) le flux q(z) passant à travers toute section de cote z peut être obtenu à partir de la mesure de variation de stock ΔS_z dans le volume de sol limité par la surface du sol et la section de cote z par la formule :

$$q(z) - q_0 = -\frac{\Delta S_z}{\Delta t}.$$

Or dans ce cas, q_0, le flux passant à travers la cote $z = 0$ est nul ; d'autre part ΔS_z est négatif (perte de stock), donc q(z) est positif et on a donc directement en valeur absolue :

$$q(z) = \left|\frac{\Delta S_z}{\Delta t}\right|.$$

Cette valeur représente la vitesse de Darcy à travers la cote z à un temps moyen entre les deux mesures $\left(\bar{t} = \frac{t' + t}{2}\right)$.

Au lieu de considérer les différences de stock on peut affiner la méthode de calcul du flux en calculant à différents instants la valeur du stock d'eau compris entre la surface du sol et le niveau de référence (cette valeur est obtenue par intégrations des profils hydriques soit $S(z, t) = \int_0^z \theta \, dz$) et en traçant la courbe $S_z(t)$ donnant la variation dans le temps de cette grandeur. A un instant t, le flux passant à travers la cote z sera dans ce cas directement donné par la pente de la courbe $S_z(t)$:

$$q(z) = -\frac{dS_z}{dt}.$$

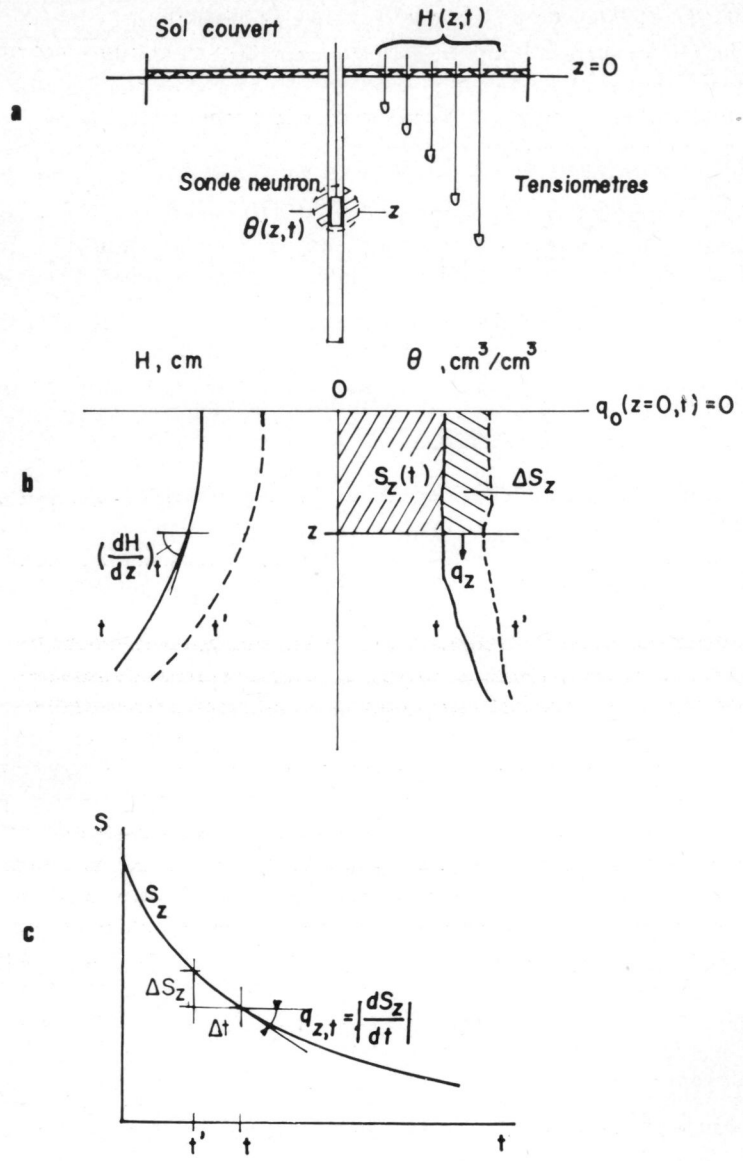


FIG. 2. — *Schéma de principe de la méthode du « drainage interne ».* 2*a* : Implantation du système de mesure. 2*b* : Détermination des variations de stock et de gradient de charge à un niveau z. 2*c* : Calcul du flux à une cote z, et à un instant par la méthode instantanée.

Cette deuxième méthode, dite méthode de calcul instantanée (Watson, 1966) est plus précise et ne nécessite pas d'interpolation entre les profils. C'est celle que nous utiliserons.

Si, à l'instant t de référence, on connaît également le profil de charge H(z, t), la pente de cette courbe à la cote z donne directement le gradient dH/dz.

On dispose donc ainsi au même instant t, à la côte z :

- de la valeur instantanée de la teneur en eau θ et de la charge H (donc de la pression $h = H + z$) ;
- de la valeur instantanée de la vitesse de Darcy q ;
- de la valeur instantanée du gradient de charge dH/dz.

En application de l'équation (2) la relation entre les deux dernières valeurs donne la conductivité hydraulique :

$$K = - \frac{q}{dH/dz} .$$

Cette valeur de K sera affectée à la valeur de la teneur en eau θ mesurée à cet instant et à cette cote.

En corrélant d'autre part θ et h on obtient un point de la courbe $h(\theta)$ représentative de l'horizon de sol considéré.

En appliquant cette procédure à différents instants et à différentes cotes on peut définir les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$ pour différents horizons. Deux exemples d'application seront donnés par la suite.

Avant de considérer ces cas pratiques, il est important d'insister sur deux points importants :

1) La méthode repose entièrement sur l'hypothèse que les transferts ont lieu dans la seule direction verticale. Or dans un essai d'infiltration il est évident que par diffusion latérale une partie de l'eau appliquée à la surface du sol viendra humidifier la zone extérieure à la zone d'essai, même avec un anneau de garde. Il faudrait alors en toute rigueur mesurer les gradients de charge également dans la direction horizontale. Afin de minimiser l'influence des transferts latéraux, il y aura donc lieu de considérer la surface d'essai la plus grande possible et de faire les mesures au centre.

2) Les deux appareils de mesure ont des domaines d'influence très différents : le tensiomètre donne une mesure très locale de la pression de l'eau, alors que la sonde neutron commencera à réagir dès que le nombre d'atomes d'hydrogène varie dans sa sphère d'influence. Cela pose un problème de fond sur la signification des mesures d'humidité obtenue en présence d'un front d'humectation se déplaçant dans un sol initialement sec, où la sphère d'influence a un diamètre initial de l'ordre de 40 cm. Il y aura donc lieu d'être très critique dans ce cas.

Pour définir la méthodologie employée, nous allons analyser dans le détail l'essai effectué à N'Diol sur sol Dieri ; nous nous bornerons ensuite à présenter les résultats relatifs à l'essai effectué dans les mêmes conditions sur le site B1 de Bambey sur sol Dior.

b) *Essai sur sol Dieri*

Cet essai a eu lieu du 22/04 au 4/06/76, donc pendant la saison sèche. Une lame de 250 mm d'eau a été apportée sur la zone d'infiltration délimitée par une surface de 1×1 m, bordée sur son pourtour par une diguette avec zone de garde de 2 x 2 m, et sur un profil initialement sec. La lame d'eau a complètement disparu à 16 h 45, le sol étant alors humidifié jusqu'à une profondeur de 120 cm et la teneur en eau à la surface du sol étant passée de 0,012 à 0,23 cm^3/cm^3.

La surface a alors été couverte avec un film plastique recouvert de paillage et l'on a suivi l'évolution des teneurs en eau dans le profil en utilisant les méthodes développées auparavant en laboratoire sur colonne de sol (Vachaud et Thony, 1970). Afin de suivre la cinétique très rapide dans ce sol, on effectue un comptage à un niveau z_K pendant un temps assez court (16 s avec la sonde SOLO), on déplace ensuite la sonde aux cotes z_{k+1} puis z_{k+2} ... jusqu'à trouver une section où la teneur en eau n'a pas varié, et l'on revient à la cote z_k, etc... ; sur ce site, les mesures ont été faites tous les 10 cm jusqu'à 1,60 m.

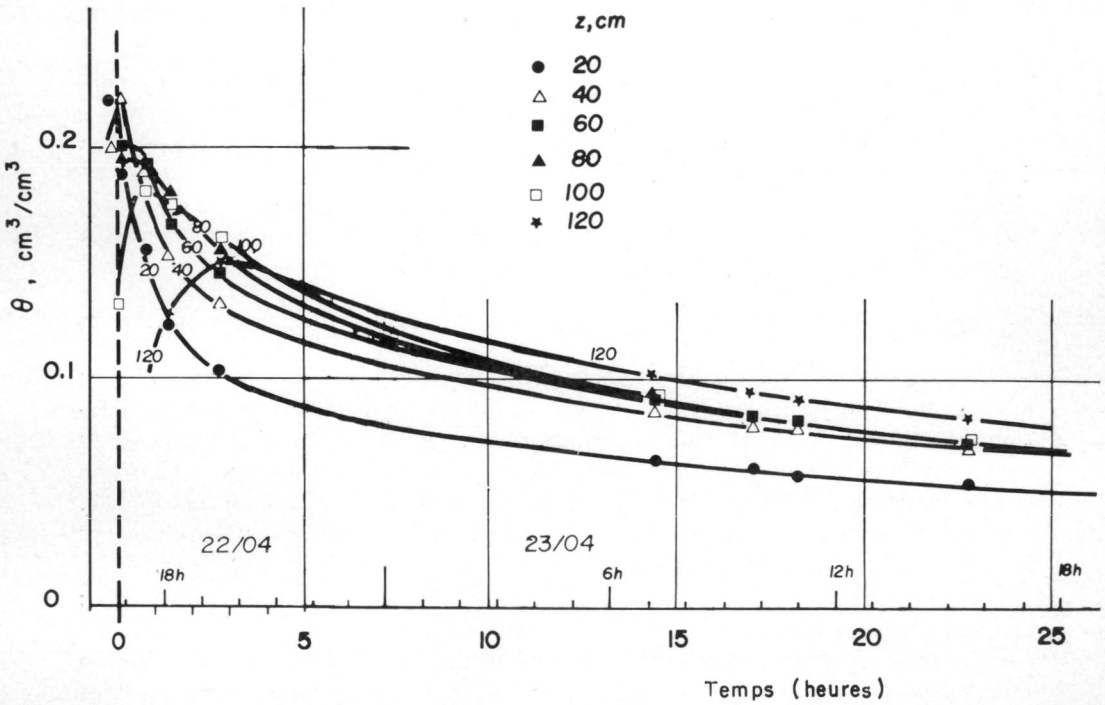


FIG. 3. — *Evolution dans le temps de la teneur en eau à différentes cotes durant l'essai de drainage interne sur sol Dieri.* Chaque point représente un point de mesure. Le temps t = 0 correspond à la disparition de la lame d'eau (16 h 45 le 22.04).

On mesure ainsi à différents niveaux les valeurs de la teneur en eau à différents temps. En reportant les points sur un graphe $\theta_z(t)$ on peut, par lissage, obtenir les courbes donnant la variation de la teneur en eau à différentes cotes (fig. 3). Il suffit ensuite de se placer à des temps t choisis depuis la disparition de la lame pour reconstituer les profils hydriques $\theta(z)$ (fig. 4) à partir de ces courbes.

Cette méthode est surtout intéressante dans l'intervalle de temps où les variations de teneur en eau sont rapides (essentiellement le premier jour), à condition bien sûr d'avoir des points de mesure suffisamment rapprochés. Cependant, même lorsque les variations deviennent très lentes, le lissage permet d'éliminer les erreurs accidentelles de mesure, et d'avoir des profils réguliers.

Les tensiomètres qui avaient été installés et amorcés avant l'essai d'infiltration n'ont pas eu le temps de se désamorcer et ont réagi très régulièrement à l'arrivée du

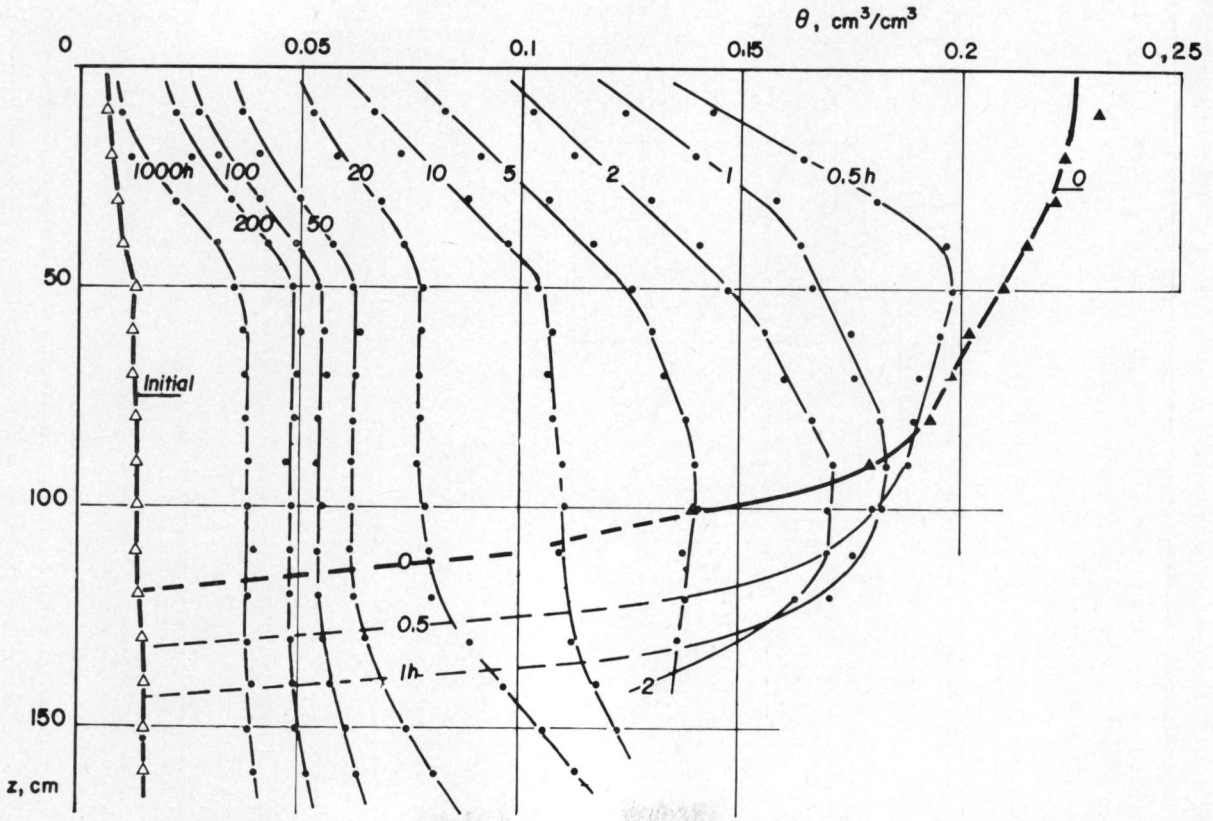


FIG. 4. — *Profils hydriques correspondants à la figure* 3. Paramètre : temps t, en h, depuis la disparition de la lame d'eau. Le profil initial est mesuré avant l'essai, le profil t = 0 correspondant à la fin de l'infiltration.

front. La même technique que dans le cas précédent a été utilisée pour traiter les mesures tensiométriques et obtenir les profils de charge à différents temps (fig. 5).

Les profils hydriques reportés figure 4 permettent d'apprécier la cinétique. A partir de la détermination des teneurs en eau à différents temps et à différentes cotes on a calculé par l'intégration de ces profils la valeur du stock cumulé entre la surface du sol et différents niveaux aux temps considérés. Cette intégration est faite facilement en affectant la teneur en eau mesurée à une cote z_k à la tranche de sol de 10 cm entourant cette cote, sauf pour la mesure à la profondeur $z_1 = 10$ cm qui est affectée à une tranche de sol allant de 0 à 15 cm.

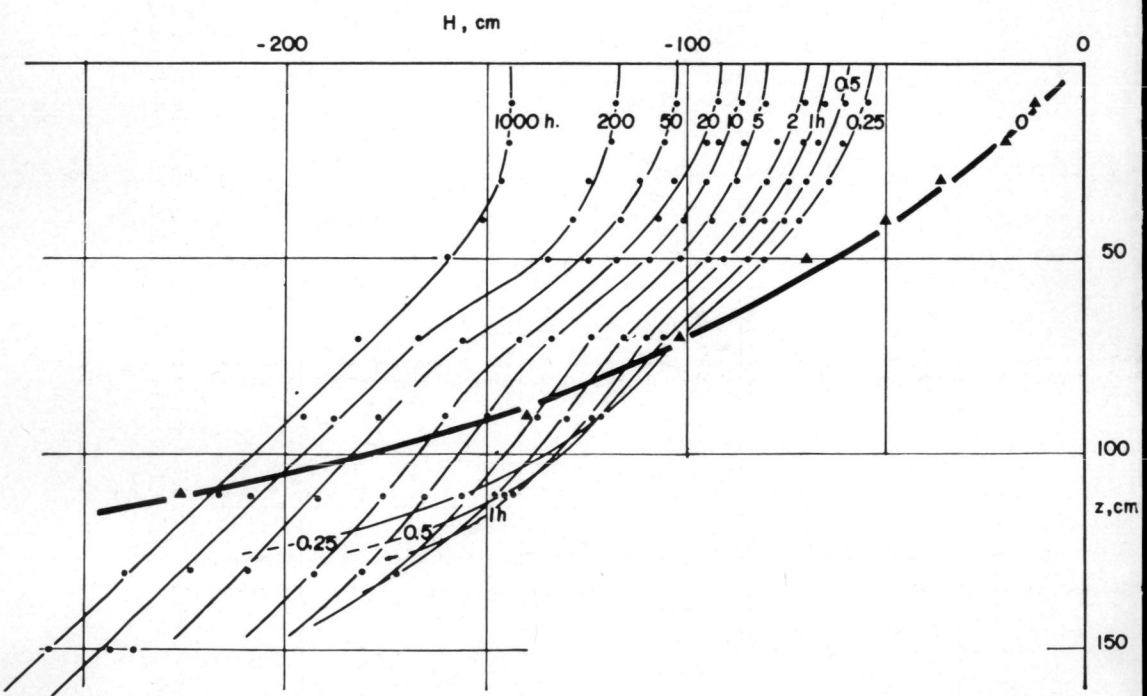


FIG. 5. — *Profils de charge hydraulique correspondant à figure 6.*
Paramètre : temps t, en h, depuis la disparition de la lame d'eau.

Si l'on exprime le stock en mm d'eau, le stock jusqu'à une cote z_j vaudra donc :

$$S_{z_j} = (1{,}5\ \theta_{10} + \theta_{20} + \ldots + \theta_k + \ldots + 0{,}5\ \theta_j) \cdot 100$$

où θ_k est la teneur en eau mesurée à la cote z_k.

Cette formule ne s'applique pas dans la première section ($z = 10$ cm) où l'on a simplement $S_{10} = \theta_{10} \cdot 100$. On trouvera, à titre d'exemple, tableau 1, les valeurs des teneurs en eau et des stocks cumulés calculés à différents instants.

Tant que le front d'humectation n'a pas atteint la dernière section de mesure ($z = 160$ cm), soit pour $t < 1{,}5$ h on notera que le stock d'eau dans le sol est bien conservé, mais les valeurs obtenues sont cependant inférieures de 10 p. 100 à la lame

TABLEAU 1

Calcul des stocks cumulés. Essai de drainage interne sur sol Dieri

Z cm	Avant essai θ cm³/cm³	Avant essai S mm	t = 0 θ	t = 0 S	t = 2 h θ	t = 2 h S	t = 10 h θ	t = 10 h S	t = 26 h θ	t = 26 h S	t = 160 h θ	t = 160 h S	t = 1 056 h θ	t = 1 056 h S
10	0,006	0,6	0,23	23	0,103	10,3	0,067	6,7	0,046	4,6	0,022	2,2	0,008	0,8
20	0,007	1,2	0,226	48,7	0,115	21,1	0,076	13,8	0,046	9,2	0,03	4,8	0,011	1,7
30	0,009	2,0	0,221	68,1	0,126	33,2	0,087	21,9	0,063	14,6	0,04	8,3	0,024	3,5
40	0,010	2,9	0,216	90,0	0,137	46,3	0,097	31,1	0,07	21,3	0,047	12,6	0,034	6,4
50	0,013	4,0	0,21	111,2	0,147	60,5	0,104	41,2	0,07	28,3	0,049	17,4	0,034	9,8
60	0,012	5,1	0,204	131,9	0,155	75,6	0,107	51,7	0,07	35,3	0,05	22 3	0,036	13,3
70	0,012	6,2	0,198	152,0	0,162	91,5	0,108	62,5	0,071	42,3	0,049	27,3	0,038	17,0
80	0,013	7,4	0,192	171,5	0,166	107,9	0,108	73,3	0,072	49,5	0,045	32	0,038	20,8
90	0,013	8,7	0,18	190,8	0,170	124,7	0,109	84,1	0,073	56,8	0,047	36,6	0,038	24,5
100	0,013	10,0	0,14	206,4	0,171	141,7	0,110	95,1	0,07	63,9	0,049	41,4	0,04	28,5
110	0,013	11,3	(0,105)	219	0,169	158,7	0,110	106,1	0,077	71,25	0,045	46,1	0,04	32,5
120	0,014	12,7	—	225	0,163	175,3	0,111	117,1	0,08	79,1	0,045	50.6	0,04	36,5
130	0,015	14,2			0,148	191	0,113	128,3	0,083	87,2	0,053	55,5	0,041	40,3
140	0,015	15,7			0.130	204,8	0,117	139,8	0,083	95,5	0,052	60,7	0,041	44,6
150	0,015	17,2			0,103	216,5	0,121	152	0,09	104,2	0,054	66,0	0,048	48,8

— Le temps t = 0 correspond à la disparition de la lame d'eau (250 mm) : le 21/04/76 à 16 h 45.
— Les stocks sont exprimés en mm d'eau.
— Pour t ⩽ 10 h, les teneurs en eau sont obtenues par lissage, d'après la figure 3 ; pour t > 10 h les valeurs de teneur en eau à chaque cote correspondent aux mesures. On dispose en plus des profils hydriques aux temps intermédiaires suivants, non reportés sur ce tableau : 1, 5, 17, 20, 23, 41, 44, 90, 208 et 504 h.

imposée (225 au lieu de 250 mm). Cette sous-estimation systématique peut être due à deux effets :

- d'une part l'écoulement n'est pas strictement vertical, et il existe durant le ressuyage un transfert latéral : à la fin de l'essai une zone de 50 cm d'épaisseur environ autour de la zone d'infiltration est humidifiée en surface ;
- d'autre part la mesure à la sonde neutron est extrêmement imprécise en présence d'un front très raide, et l'utilisation de la courbe d'étalonnage, qui repose sur l'hypothèse que la teneur en eau varie peu dans la sphère d'influence, conduit à une erreur sur le calcul des teneurs en eau tant que la section située environ à 15 cm en dessous de la section de mesure n'est pas humidifiée. On obtient donc une double erreur : d'une part le temps d'apparition de l'eau mesuré avec la sonde neutron est surestimé (et l'on notera que les réponses des tensiomètres au passage du front sont systématiquement en retard sur celles de la sonde neutron, ce qui définit bien l'importance du domaine de mesure) ; d'autre part durant toute l'humidification de la section de mesure les teneurs en eau sont sous-estimées du fait de l'existence d'un gradient important dans la sphère d'influence.

Si l'on ne s'intéresse qu'aux sections de mesure situées dans la zone de sol humidifiée au moment de la disparition de la lame d'eau (soit pour z ⩽ 120 cm) durant le ressuyage toutes ces sections vont drainer uniformément. Les courbes donnant la variation du stock cumulé entre la surface du sol et certaines sections de mesure sont reportées figure 6. Il suffit de prendre la pente de ces courbes à des instants choisis

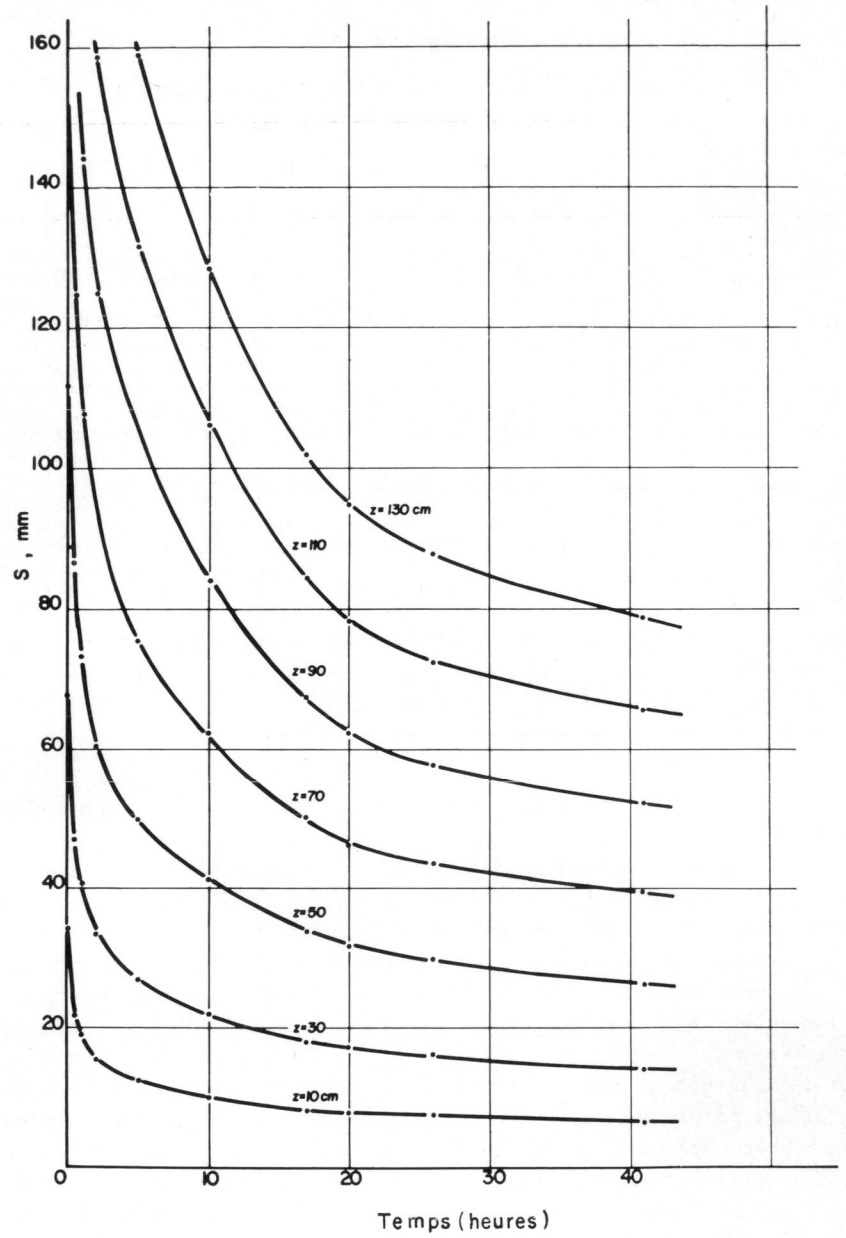


FIG. 6. — *Variation du stock hydrique S, en mm d'eau, entre la surface du sol et un niveau de référence z, durant l'essai de drainage interne sur sol Dieri.* L'origine des temps (t = 0) correspond à la disparition de la lame d'eau.

pour obtenir la valeur instantanée du flux *au niveau et au temps choisis*. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 2 à titre d'exemple pour la cote z = 30 cm.

A partir des profils de charge (fig. 5) on peut également facilement déterminer, par la pente de ces courbes, le gradient de charge dH/dz aux mêmes cotes et aux mêmes

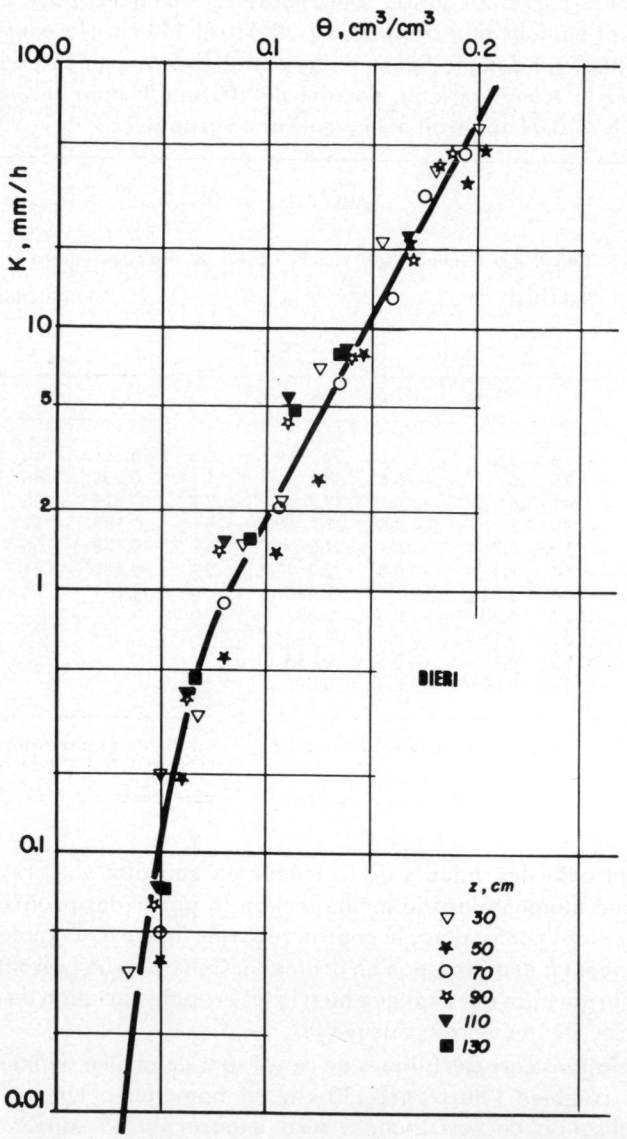


FIG. 7. — *Relation entre conductivité hydraulique* (*en* mm/h) *et teneur en eau* (cm^3/cm^3), *toutes sections confondues, obtenue lors de l'essai de drainage interne sur sol Dieri.*

instants. On notera ainsi que pendant tout le ressuyage on a bien $dH/dz = 0$ à la cote $z = 0$; l'hypothèse de flux nul à la surface du sol est donc bien respectée. En profondeur, pour $z > 100$, les gradients évoluent graduellement vers une limite $dH/dz = -1$, qui correspond à un écoulement gravitaire et qui est obtenue au bout d'environ 50 h.

Il suffit ensuite de diviser la valeur du flux par le gradient de charge mesuré au même moment dans la même section pour obtenir la conductivité hydraulique, qui est ensuite affectée à la valeur de la teneur en eau obtenue à ce moment et dans cette

section. Les valeurs correspondantes sont reportées tableau 2, pour z = 30 cm. Les mêmes calculs ont été faits aux cotes 50, 70, 90, 110 et 130 cm ; la courbe K(θ), toutes sections confondues, est donnée figure 7. La variation très grande de la conductivité hydraulique avec la teneur en eau, passant de 100 mm/h pour θ = 0,22 à environ 0,01 mm/h pour θ = 0,04 apparaît nettement sur ce graphe.

TABLEAU 2

Calcul des relations K(θ) et h(θ) - Essai de drainage interne

Sol Dieri

t	Z = 30 cm				
	θ	h	dS/dt	dH/dz	K
0	0,280	— 4			
0,25	0,200	— 35	36	— 0,62	58,1
0,5	0,180	— 41	24	—	38,7
1	0,155	— 45	13	— 0,6	21,7
2	0,127	— 50	4,2	—	7,0
5	0,106	— 58	1,3	— 0,6	2,2
10	0,088	— 66	0,84	—	1,4
20	0,067	— 72	0,20	— 0,6	0,33
50	0,050	— 81	0,11	— 0,54	0,20
200	0,035	— 95	0,1	— 0,5	0,034
1 000	0,021	— 116	0,0026	— 0,37	0,007

Unités : t : h ; θ : cm³/cm³ ; h : cm d'eau ; dS/dt : mm/h ; K : mm/h.

Sol Dior - B1

t	Z = 30 cm				
	θ	h	dS/dt	dH/dz	K
6 h	0,261	— 36	37	— 0,56	66,1
1 j	0,233	— 46	25	— 0,52	48,0
2 j	0,214	— 55	10,8	— 0,46	23,4
4 j	0,189	— 62	4,0	— 0,45	8,8
6 j	0,178	— 66	0,65	—	1,4
9 j	0,151	— 71	0,27	—	0,6

Unités : θ : cm³/cm³ ; h : cm d'eau ; dS/dt : mm/jour ; K : mm/jour.

En corrélant enfin les valeurs de la teneur en eau aux valeurs de la pression obtenue au même moment dans la même section (à partir des profils de charge) on obtient, toutes sections confondues, la courbe reportée figure 8. On notera que tous les points correspondent à une évolution en drainage. Cette courbe présente une pression d'entrée d'air marquée, ce qui explique bien la très rapide variation de charge près de la surface du sol au début du ressuyage.

Les deux relations caractéristiques de ce sol sont donc bien définies. Il est remarquable de voir combien l'horizon 0-130 cm est homogène. Un exemple pratique concernant l'utilisation de ces données sera exposé par la suite.

c) *Essai sur sol Dior*

Le même type d'essai a été effectué à Bambey sur le site B1 qui avait été au préalable desséché par une jachère intensive. Une lame d'eau de 250 mm a également été apportée le 8.07.1975 sur une surface de 16 m² entourée d'une diguette. La lame a disparu à 14 h 15 le 8.07, et nous analyserons le ressuyage durant les 9 jours suivants. Sur ce site on doit noter que les mesures à la sonde neutron ont été effectuées jusqu'à une profondeur de 330 cm. Les résultats détaillés sont également reportés dans le mémoire de maîtrise de Tyano (1976).

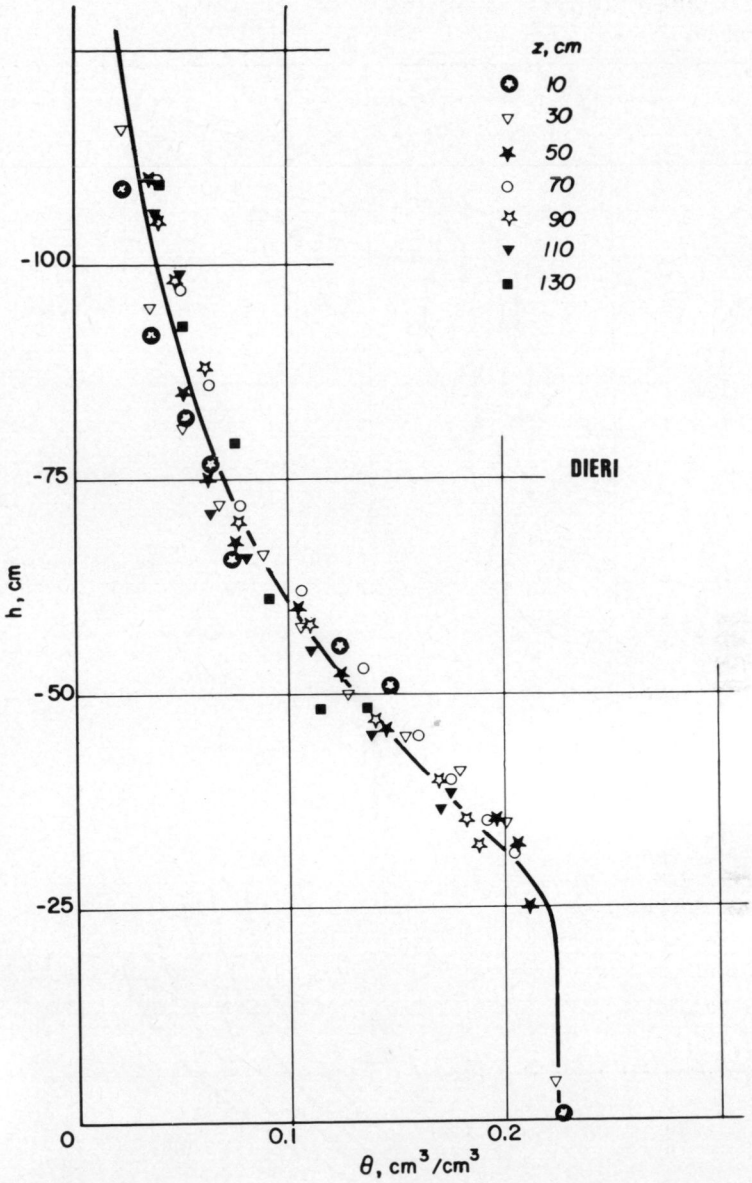


FIG. 8. — *Relation entre pression de l'eau (exprimée en cm) et teneur en eau (« courbe de succion »), toutes sections confondues, obtenue lors de l'essai de drainage interne sur sol Dieri.*

La même procédure que dans le cas précédent ayant été utilisée, nous ne reviendrons pas sur les détails. On présente simplement, figures 9 et 10, les profils hydriques et les profils de charge obtenus 6 h, 1 j, 2 j, 4 j et 9 j après le début du ressuyage, ainsi que le profil mesuré à disparition de la lame ($t = 0$). On doit noter que l'horizon superficiel (entre 0 et 20 cm) correspond à une tranche de sol ayant préalablement été tra-

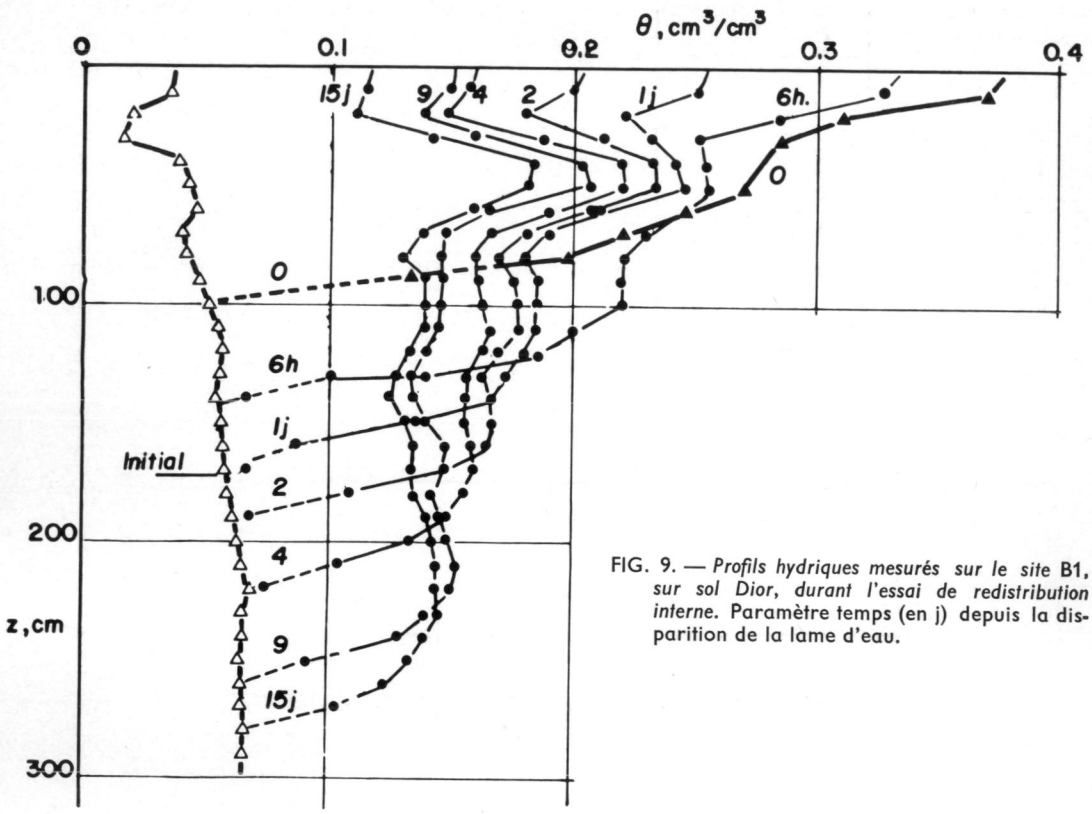


FIG. 9. — *Profils hydriques mesurés sur le site* B1, *sur sol Dior, durant l'essai de redistribution interne.* Paramètre temps (en j) depuis la disparition de la lame d'eau.

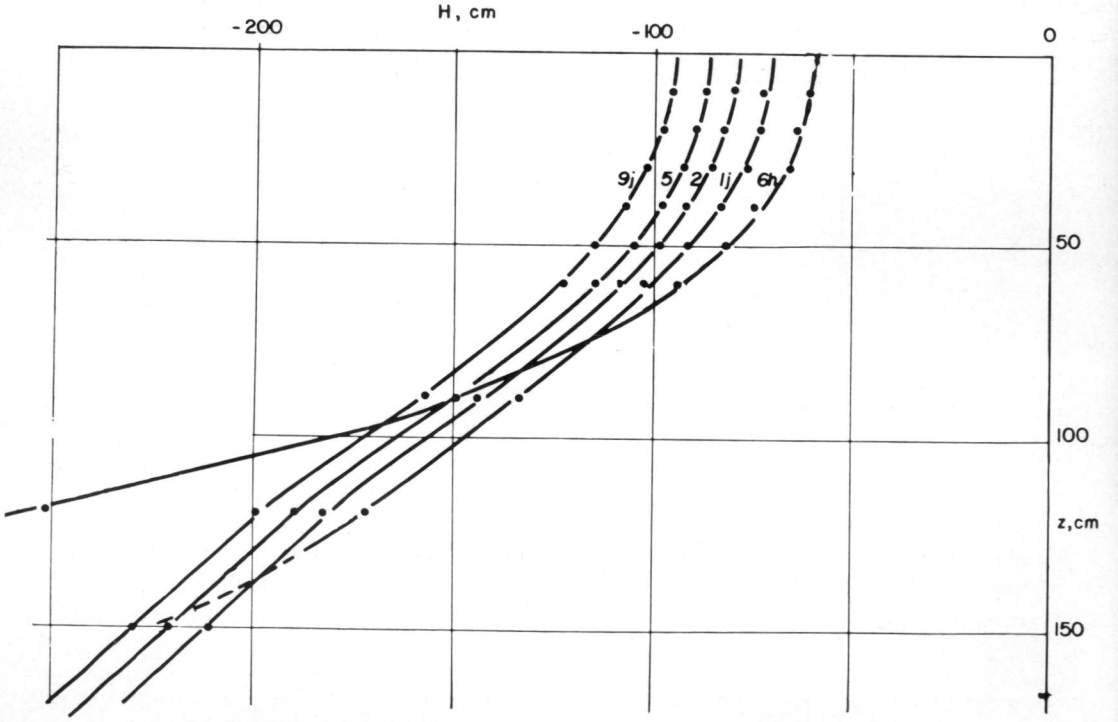


FIG. 10. — *Profil de charge correspondant aux résultats de la figure* 9.

vaillée donc plus grande de porosité, ce qui explique la forme des profils. On peut également contrôler d'après les courbes figure 10, qu'il n'y a aucun écoulement à travers la cote $z = 0$.

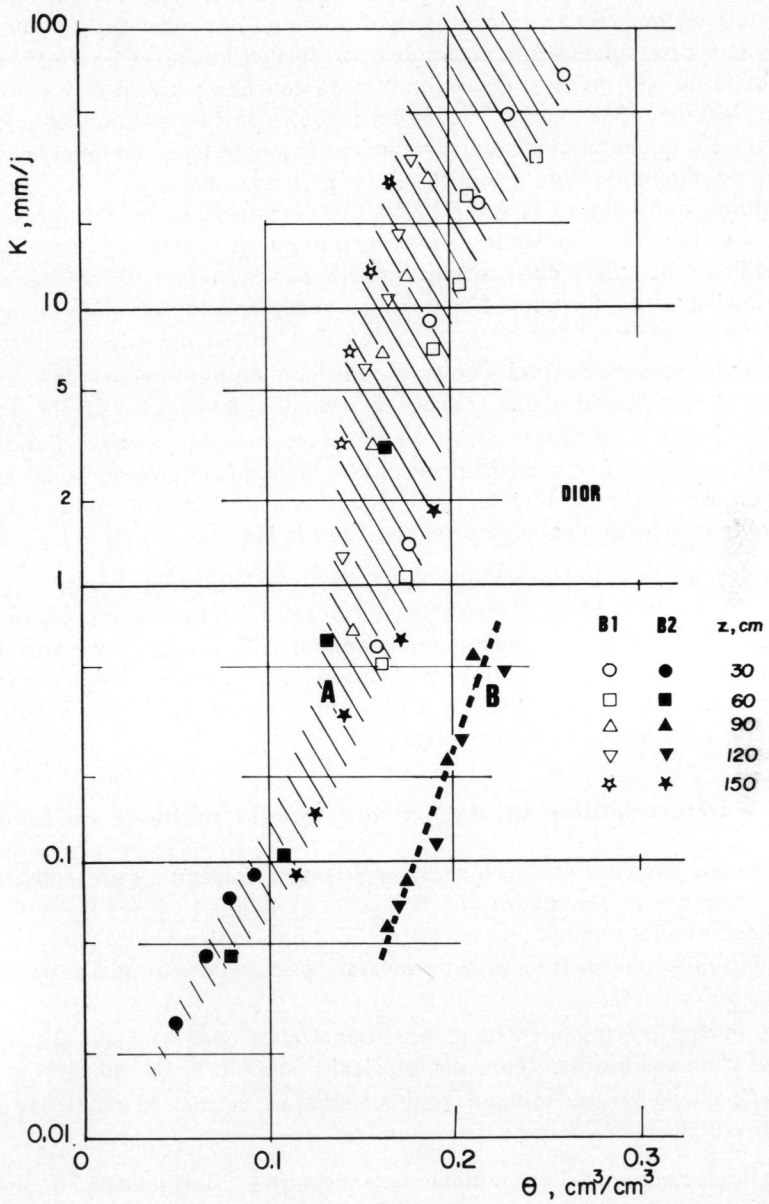


FIG. 11. — *Relation entre conductivité hydraulique* (mm/j) *et teneur en eau* (cm^3/cm^3) *pour le sol Dior.* Les valeurs correspondant à l'essai de drainage interne (essai B1) sont représentées par les figures ouvertes ; les valeurs correspondant à l'essai en bilan naturel (essai B2) sont représentées par les figures pleines. Le domaine A caractérise la relation $K(\theta)$ pour ce sol, toutes sections confondues. La courbe B correspond à l'influence de la couche d'accumulation sur les mesures effectuées aux niveaux 90 et 120 cm sur le site B2.

On a reporté, à titre d'exemple, tableau 2, les valeurs de teneurs en eau, pression d'eau, flux, gradients de charge et conductivité hydraulique obtenues à 30 cm. Les mêmes calculs ont également été effectués à 60, 90, 120 et 150 cm et les valeurs de $K(\theta)$ pour les 5 horizons sont reportées figure 11 (points correspondants à l'essai I).

On notera dans ce cas un assez grand domaine de variation des valeurs de la conductivité hydraulique avec la profondeur. La surface hachurée figure 11 représente la variabilité de $K(\theta)$ avec z. Deux familles de courbes peuvent être considérées : d'une part les valeurs obtenues à 30 et 60 cm ; d'autre part celles relatives aux cotes 90, 120, 150 cm. L'augmentation de K en profondeur (à teneur en eau donnée) peut s'expliquer par la diminution de proportion de particules fines.

On donne enfin, figure 12 (points relatifs à l'essai B1), la relation pression effective-teneur en eau. Dans ce sol les transferts sont moins rapides que dans le cas précédent, et l'on a pu suivre dans certaines sections (à 60, 120 et 150 cm) les cinétiques d'humidification et de drainage. L'hystérésis dans la relation pression-teneur en eau apparaît alors nettement sur cette figure, où l'on notera deux types de relations :

- pour les sections de faibles cotes, qui drainent en permanence, la relation $h(\theta)$ est unique et correspond à une courbe de drainage principale (courbe A) ;
- pour les sections situées à $z > 60$ cm, la relation $h(\theta)$ évolue d'abord sur la courbe correspondant à la branche principale en humidification (courbe D), et une fois la teneur en eau maximum atteinte, sur une courbe de drainage secondaire (courbe C) qui rejoint la courbe de drainage principale aux faibles valeurs de la teneur en eau.

Ce sol peut donc présenter une hystérésis très importante, puisque pour une pression effective de — 50 cm d'eau, la teneur en eau correspondante pourra, en fonction du cycle d'humidification précédent auquel aura été soumis le sol, varier de 0,12 à 0,24 cm^3/cm^3. Ceci montre clairement le risque qu'il y aurait à déduire la teneur en eau de mesure de pression d'eau en utilisant une courbe de drainage obtenue par exemple sur échantillon en laboratoire.

5. — Détermination de $K(\theta)$ et $h(\theta)$ par la méthode du bilan

La méthode que nous venons d'analyser est intéressante, mais présente cependant un certain nombre de limitations.

Elle nécessite notamment une infrastructure importante et exige que l'on dispose de très nombreuses mesures au début des essais. Des limitations plus restrictives sont de plus les suivantes :

- l'hypothèse d'écoulement unidimensionnel n'est généralement pas respectée, ce qui peut conduire à des erreurs sur le calcul du flux et de la conductivité ;
- sauf pour un sol très sableux, cette méthode ne permet de définir les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$ que dans le domaine assez humide.

La méthode que nous allons maintenant exposer n'est pas sujette à ces limitations. Elle permet de plus d'avoir directement le bilan hydrique. Elle exige cependant, pour que les résultats soient significatifs, que durant la période de mesure il y ait une continuité du processus climatique : pas de périodes de pluies trop rapprochées pendant les périodes de mesures, et que l'on travaille sur sol nu. Elle est de ce fait bien adaptée aux régions à climat tropical ou sub-tropical.

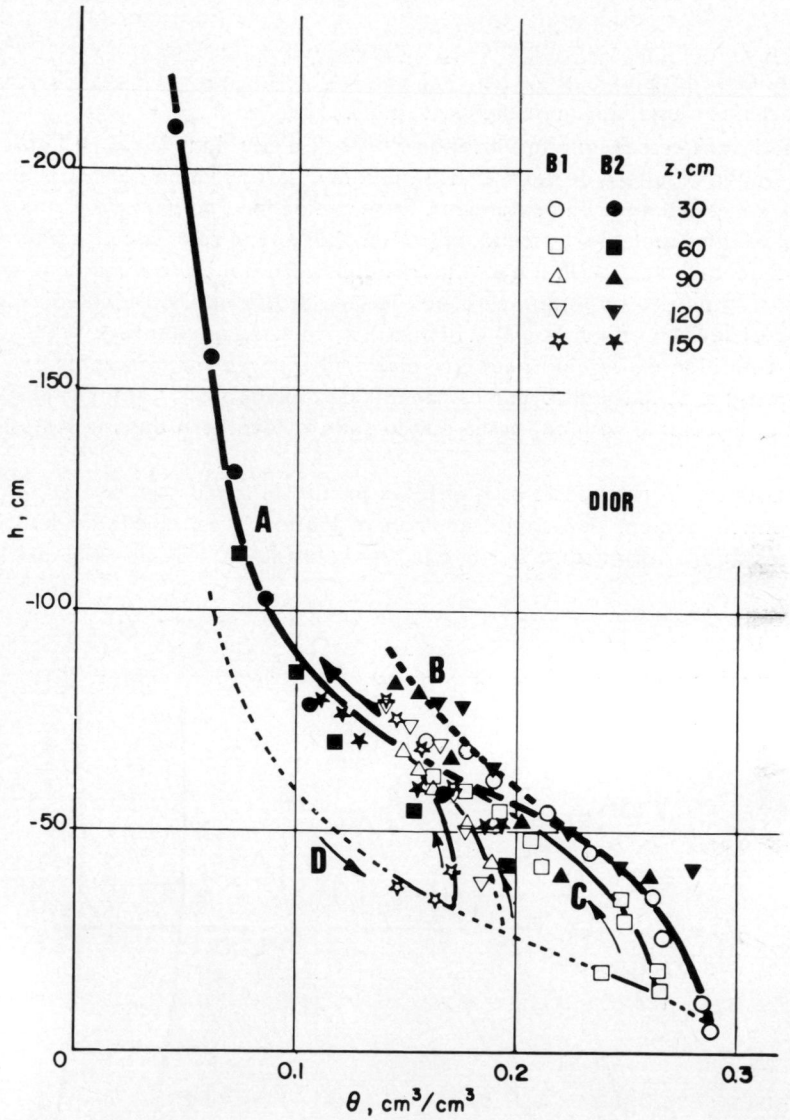


FIG. 12. — *Relation entre pression de l'eau et teneur en eau pour le sol Dior.* Même caractérisation des points que pour la figure 11.

- La courbe A caractérise la relation h(θ) en drainage, toutes sections confondues.
- La courbe B correspond à l'influence de la couche d'accumulation sur le site B2.
- La courbe C caractérise une des relations h(θ) dans le domaine d'hystérésis lors du passage d'une évolution en humidification à une évolution en drainage.
- La courbe D caractérise la relation h(θ) en humidification.

a) *Principe de la méthode*

Plutôt que d'imposer artificiellement un apport d'eau ensuite soumis à un ressuyage, on se limite à suivre l'évolution naturelle des teneurs en eau et des pressions entre deux épisodes pluvieux qui peuvent, comme dans le cas que nous allons étudier, être séparés par une saison sèche de 9 mois.

On sait dans ce cas, que la variation du stock d'eau dans le sol en l'absence de toute végétation résultera de deux effets simultanés ; évaporation dans la partie supérieure du sol, et drainage en profondeur. En terme de flux, on aura donc une zone de sol soumise à un écoulement ascendant (soit $q < 0$) et une zone soumise à un écoulement descendant (soit $q > 0$). Par continuité, il existera donc à tout moment, entre les deux zones un niveau où le flux sera nul (le *plan de flux nul*), qui doit correspondre d'après la loi de Darcy (équation 3), à $dH/dz = 0$, donc au maximum de la courbe H(z) (fig. 2). La position de ce plan peut être aisément repérée sur les profils de charges hydrauliques ; la zone soumise à un assèchement par évaporation étant de plus en plus importante, la cote de ce plan, notée par la suite z_0, évoluera dans le temps (Royer et Vachaud, 1974).

Supposons qu'à deux instants t_1 et t_2 les profils de teneurs en eau et de charge, mesurés simultanément par sonde neutron et tensiomètres, correspondent à ceux schématisés figure 13, et soit $z_0(t_1)$ et $z_0(t_2)$ les cotes du plan de flux nul aux instants

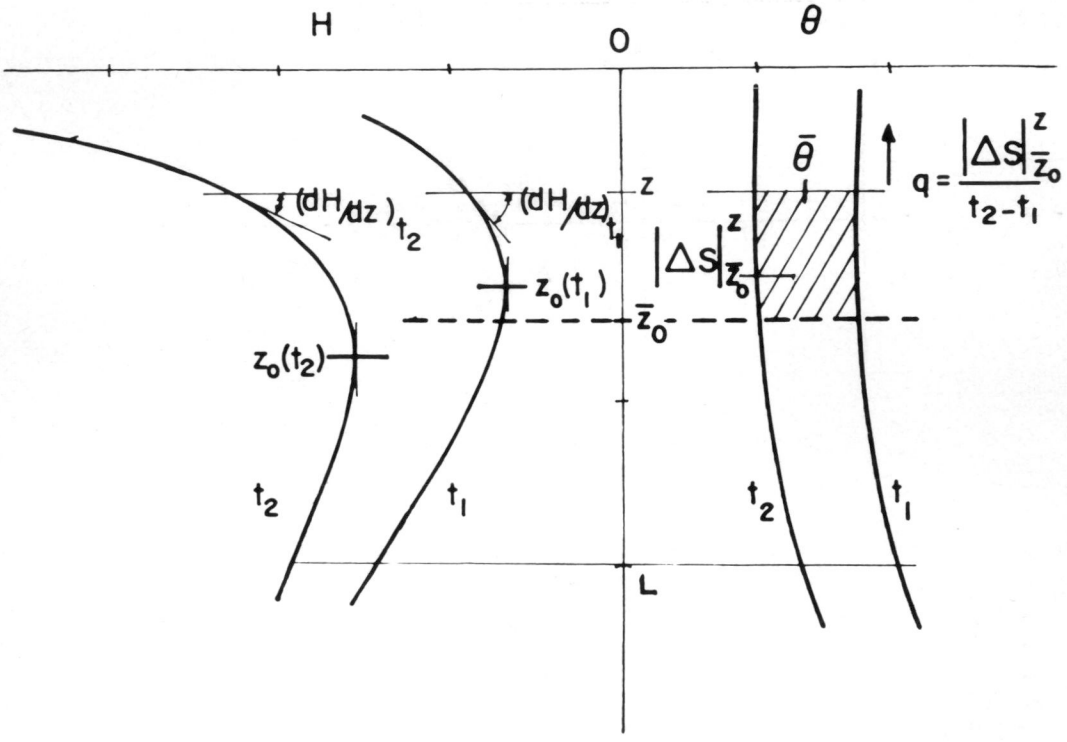


FIG. 13. — *Schéma de principe du calcul des flux par la méthode du bilan (plan de flux nul).*

correspondants. Dans un but de simplification, on supposera qu'en moyenne le flux est nul entre les instants t_1 et t_2 à la cote :

$$\overline{z_0} = \frac{z_0(t_1) + z_0(t_2)}{2}.$$

Si l'on considère dès lors un niveau quelconque z, situé par exemple toujours au-dessus de z_0, le flux moyen ascendant passant à travers cette cote dans l'intervalle $(t_2 - t_1)$ vaudra, en application de l'équation (3) :

$$q = \frac{|\Delta S|_{\overline{z_0}}^{z}}{t_2 - t_1}$$

où $|\Delta S|_{\overline{z_0}}^{z}$ est la variation de stock entre les niveaux $\overline{z_0}$ et z durant l'intervalle considéré (surface hachurée fig. 13). Ce flux devra être affecté à la teneur en eau moyenne $\overline{\theta}$ obtenue dans la section z entre t_1 et t_2. Il sera enfin ramené pour le calcul de K au gradient moyen $\overline{(dH/dz)}$ obtenu également dans la section z entre t_1 et t_2.

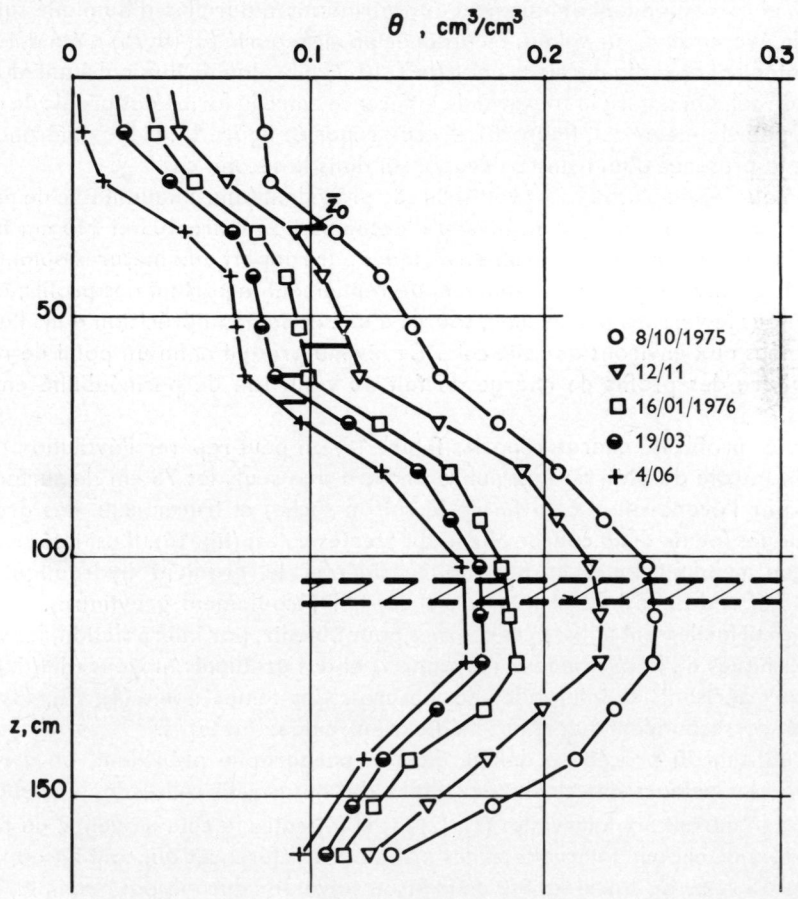


FIG. 14. — *Profils hydriques mesurés sur le site* B2 (*sol Dior*) *durant la saison sèche* 1975-1976 *sur sol nu.* La couche hachurée entre les cotes 105 et 110 cm représente le niveau d'accumulation.

Les valeurs de $\overline{\theta}$ et $\overline{(dH/dz)}$ pourront être obtenues soit par moyenne arithmétique, soit d'une façon plus précise (surtout si les variations dans le temps sont importantes) en traçant à partir des mesures les courbes $\theta(t)$ ou $dH/dz = f(t)$ obtenues dans la section considérée et en procédant par interpolation. On donne par la suite un exemple d'application.

Notons enfin que deux sections de contrôles particulièrement importants permettent de définir les termes du bilan hydrique : la cote $z = 0$ (surface du sol) et la cote $z = L$, qui est la dernière section de mesure. En effet entre t_1 et t_2 les valeurs de $|\Delta S|_{z_0}^{z}$ et $|\Delta S|_{L}^{\overline{z_0}}$ représentent directement respectivement la lame d'eau évaporée et la composante de drainage à la base du profil.

b) *Exemple d'application sur sol Dior — Site* B2

A titre d'exemple on considère l'évolution des profils d'humidité et de charge (fig. 14-15) obtenus sur le site B2 durant toute la saison sèche allant du 8.10.75 au 4.06.76, et correspondant uniquement aux variations naturelles d'humidité suite à la demande évaporative sur sol nu. Le premier profil reporté (8.10.75) a été déterminé immédiatement après la dernière pluie (le 7.10.75), le plan de flux nul étant alors à la surface du sol. On notera la très grande différence entre la forme des profils de charge donnés, pour le même sol, figure 10, et ceux reportés figure 15. Cette différence provient de la présence d'un transfert évaporatif dans le second cas.

Bien que le site B2 soit assez voisin du site précédent (une cinquantaine de mètres), on notera que la présence d'un niveau d'accumulation entre 105 et 110 cm modifie considérablement l'allure des profils hydriques par rapport aux mesures obtenues sur le site B1. Ce niveau produit notamment un renflement important des profils, et sera, comme nous le verrons par la suite, source d'une certaine imprécision dans l'analyse des données aux environs de cette cote. Ce niveau produit enfin un point de rupture dans l'allure des profils de charge du fait du contraste de perméabilité entre les horizons.

Sur les profils de charge reportés figure 15, on peut repérer l'évolution dans le temps de la cote du plan de flux nul (on notera que seuls les 75 cm de surface sont affectés par l'évaporation à la fin de la saison sèche) et tracer celle des gradients hydrauliques (pente de la courbe H(z) à différentes cotes) (fig. 16). Il est intéressant de noter que pendant toute la période considérée, le gradient hydraulique pour $z = 150$ cm reste constant et très voisin de -1 (écoulement gravitaire).

On peut facilement utiliser ces courbes pour obtenir, par interpolation, les valeurs caractéristiques de la profondeur moyenne $\overline{z_0}$ et des gradients moyens $\overline{(dH/dz)}$ à des temps caractérisant les intervalles de mesures. Ces temps notés (1), (2), (3) et (4) figure 16, correspondent aux temps médians entre deux mesures.

En utilisant la procédure définie dans le paragraphe précédent, on a reporté tableau 3, les valeurs des stocks aux dates de mesure, et celles des variations de stock $|\Delta S|_{z_0}^{z}$ durant les intervalles (1), (2) (3) et (4) entre la cote moyenne du plan de flux nul lors de chaque intervalle et des niveaux de références qui sont $z = 0$, 30, 60, 90, 120 et 150 cm. Ce calcul est fait de la façon suivante : durant, par exemple, l'intervalle n° 2 (entre le 12.11.75 et le 16.01.76), la profondeur moyenne $\overline{z_0}$ du plan de flux est estimée être 56 cm. Le 12.11, le stock entre la surface du sol et la cote 56 vaut 45,6 mm

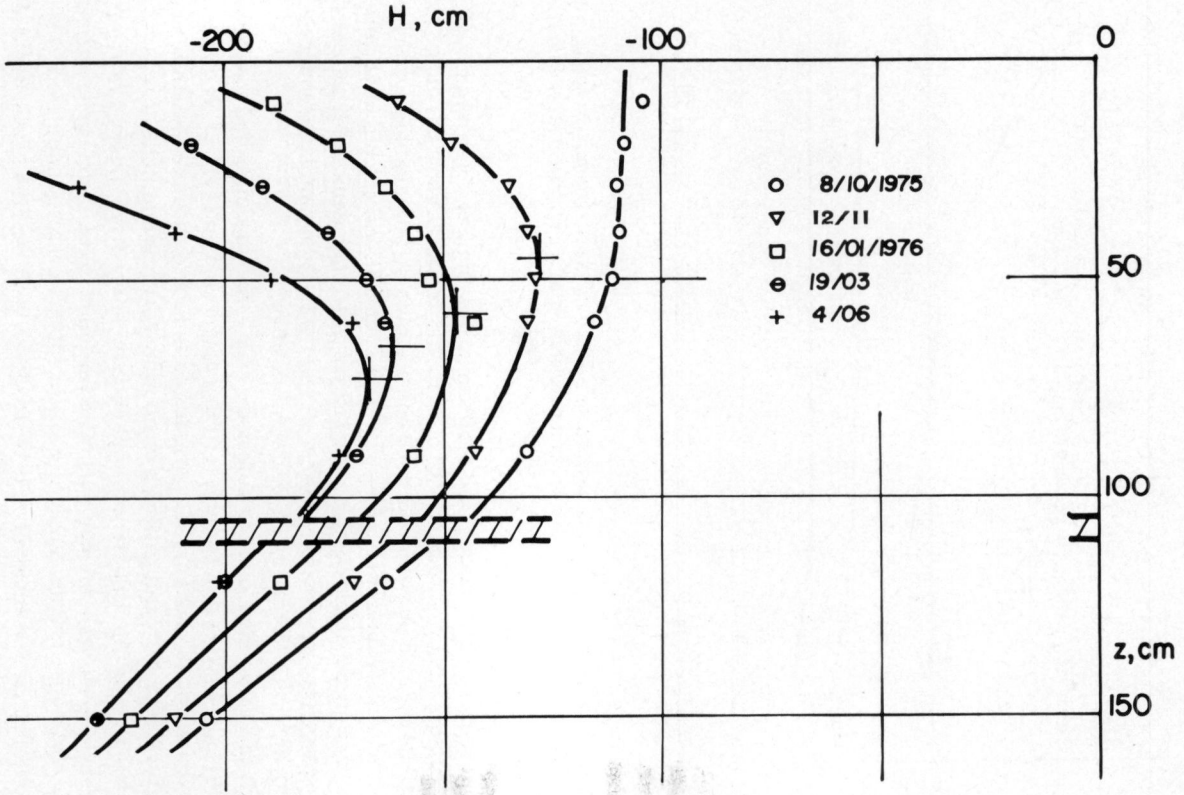


FIG. 15. — *Profil de charge correspondant aux mesures reportées figure* 14.

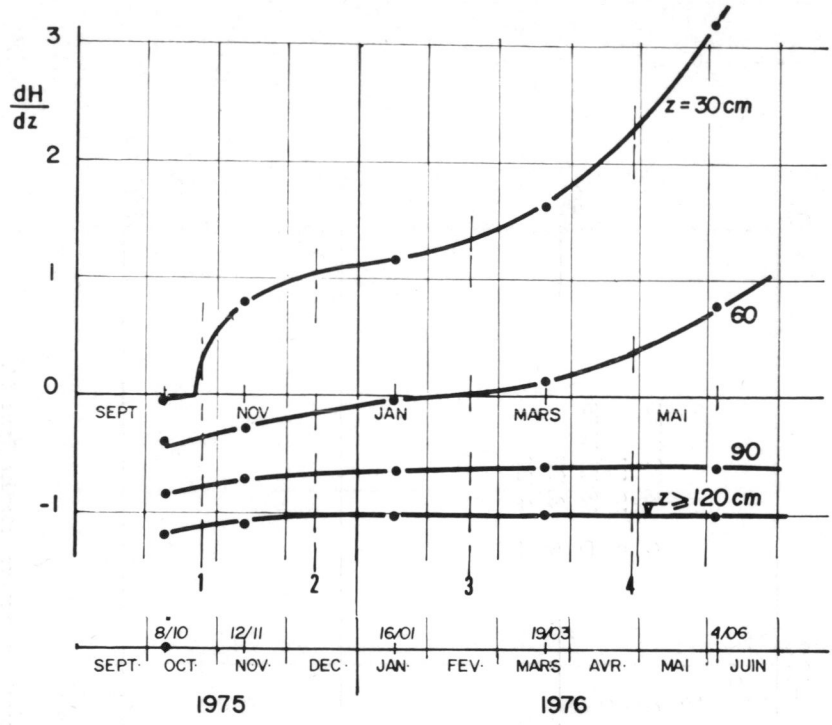


FIG. 16. — *Evolution durant la saison sèche* 1975-76 *du gradient de charge à différents niveaux mesurés sur le site* B2. Les temps médians entre deux mesures sont notés (1), (2), (3), et (4) et servent à définir les valeurs moyennes des variables entre deux mesures.

(valeur pondérée entre le stock jusqu'à 50 cm : 38,6 mm, et celui jusqu'à 60 cm : 50,3 mm $= 38{,}6 + (50{,}3 - 38{,}6) \times 0{,}6)$; le 16.01, le stock entre les deux mêmes niveaux est 37,4 mm, La variation de stock entre le plan de flux nul et la surface du sol durant cet intervalle vaut donc $45{,}6 - 37{,}4 = 8{,}2$ mm. Si l'on calcule la variation de stock entre le plan de flux nul et la cote 120 cm entre ces deux dates on obtiendra de la même façon $(166{,}8 - 45{,}6) - (137{,}8 - 37{,}3) = + 20{,}8$ mm. La première valeur est, par convention, négative, la seconde positive.

En divisant les valeurs ainsi calculées de $|\Delta S|_{z_0}^{z}$ par la durée de l'intervalle, on obtient les valeurs des flux qui, ramenées aux gradients moyens $\overline{(dH/dz)}$ et aux teneurs en eau moyennes pour chacune des périodes considérées, et aux cotes de référence, donnent les valeurs de conductivité hydraulique correspondantes.

Les valeurs de $K(\theta)$ ainsi obtenues sont également reportées figure 11 (points correspondants à l'essai B2). En comparant ces valeurs avec celles obtenues par la méthode du drainage interne, sur le site voisin (points correspondants à l'essai B1), on voit que les méthodes sont complémentaires pour les niveaux $z = 30$, 60 et 150 cm. A 90 et 120 cm, on obtient des points répartis sur la courbe B qui est franchement en dehors du faisceau caractéristique A. Cet écart doit provenir essentiellement d'un biais lié à la méthode de mesure ; bien que d'épaisseur très faible (5 cm en moyenne) la couche située aux environs de $z = 105$ est très humide, très compacte et a une très grande teneur en matière organique : elle se comporte de ce fait comme un réflec-

TABLEAU 3

Sol Dior site B2 - *Bilan hydrique sous évaporation naturelle durant la saison sèche* 1975-1976 - *Sol nu*

Z	Stock 8.10.75	ΔS mm	Stock 12.11.75	ΔS	Stock 16.1.76	ΔS	Stock 19.3.76	ΔS	Stock 4.6.76
0		—8,3		— 8,2		— 6,6		—11,4	
20	16,2		9,8		7,8		5,2		1,1
30	25,8	= —0 =	17,7	— 4,6	14,1	— 4,6	12,1	— 3,4	4,1
40	36,8		27,7		22,4		19,1		9,8
50	51,4		38,6	= 0 =	31,6		26,8		16,6
60	66,3	+ 7,8	50,3	+ 1,1	41,2	= 0 =	35,1		23,8
70	83,0		64,1		52,		43,7	= 0 =	32,3
80	102,2		81,3		66,		57,3		43,5
90	123,6	+ 14,3	101,1	+ 9,7	83,2	+ 4,1	72,5	+ 3,6	57,5
100	147,0		122,3		100,8		89,0		73,1
110	171,4		144,4		119,2		108,3		89,6
120	196,1	+ 21,1	166,8	+ 20,8	137,8	+ 7,5	123,7	+ 6,1	106,2
130	219,9		187,9		155,9		140,0		121,8
140	241,4		206,7		171,7		154,2		135,0
150	260,2	+ 28,9	223,1	+ 29,8	185,1	+ 11,9	166,6	+ 8,6	146,6
		1		**2**		**3**		**4**	

Valeurs intermédiaires :

Cote du plan de flux nul z_0 cm...	31	56	62	68
Lame évaporée, mm	— 8,3	— 8,2	— 6,6	—11,4
Lame percolée à 150 cm, mm	28,9	29,8	11,9	8,6

Valeurs cumulées : Variation de stock totale entre 0 et 150 cm : *113,6 mm* dont évaporation totale : — *34,5 mm* ; percolation totale à 150 cm : *79,1 mm*.

N. B. Les valeurs de ΔS sont prises négatives dans la zone $z < z_0$ (évaporation), et positives dans la zone $z > z_0$ (percolation).

teur de neutron, et l'on se trouve dans un cas analogue à celui étudié par Bell et Mc Culloch (1966) qui consiste à une surestimation de teneurs en eau dans une zone d'épaisseur 20 à 30 cm située au-dessus, ou au-dessous de l'interface. De ce fait, on peut estimer qu'entre les cotes 80 et 135 cm, toutes les mesures de teneur en eau sont surestimées. Il aurait fallu dans ce cas faire une courbe d'étalonnage spécifique à ce domaine. Il n'y a cependant pas lieu de penser que la pente de cette courbe puisse changer d'une façon importante avec les variations d'humidité ; les variations de stock, donc les valeurs des flux sont sûrement correctes. Comme d'un autre côté les tensiomètres aux cotes 90 et 120 donnent une mesure locale de la pression, les gradients de charge aux cotes 90 et 120 ne sont sûrement pas affectés par la présence de la couche à la cote 105. Les valeurs de K obtenues à ces deux niveaux sont certai-

nement correctes, et selon toute probabilité, la courbe (B) se trouve simplement translatée vers la droite par une surestimation systématique d'environ 0,05 cm^3/cm^3 des teneurs en eau.

On peut également utiliser les résultats de cet essai pour déterminer la relation $h(\theta)$ dans les domaines de faibles humidités. Il suffit cette fois de corréler, à une cote donnée, les mesures d'humidité et de pression faites le même jour. Les points correspondants sont également reportés figure 12 (essai B2) ; on notera que tous des points sont relatifs à une évolution dans le sens d'un drainage. On voit également que la relation $h(\theta)$ à 90 et 120 est différente (courbe B), ce qui peut correspondre, comme pour la relation $K(\theta)$, à une surestimation systématique de θ à ces niveaux.

Il ressort de ces deux relations ($K(\theta)$ et $h(\theta)$) que, dans l'ensemble, les différents niveaux de sol étudiés sur les deux profils sont assez homogènes et peuvent être caractérisés par des relations uniques, à l'exception de la couche existant à la cote 100 sur le profil B2.

On a enfin profité de ces essais pour définir les termes du bilan hydrique pendant la période considérée. En se reportant au tableau 3, les valeurs de $|\Delta S|$ apparaissant pour chaque intervalle aux lignes $z = 0$ et $z = 150$ représentent en mm d'eau les quantités évaporées et drainées.

En cumulant ces valeurs il apparaît que pendant toute la saison sèche allant du 8.10.75 au 4.06.76, l'évaporation totale est de *34,5 mm*, alors que *79 mm* d'eau se sont infiltrés en profondeur pour recharger les réserves souterraines. Le chiffre de 35 mm est à rapprocher d'une Evaporation Bac Normalisé classe A de 2 350 mm pour la même période !

6. — Discussion et conclusion

On dispose donc, grâce à ces deux méthodes, d'un outil permettant de caractériser les propriétés hydrodynamiques d'un sol à partir de mesures non destructibles *in situ*. La connaissance de ces relations peut en soi paraître de bien peu d'intérêt. C'est néanmoins, comme nous allons tenter de le montrer par la suite, le préalable indispensable à une meilleure gestion des ressources hydriques stockées dans le sol.

Il est d'abord évident d'après ces résultats, que les deux sols étudiés ont un comportement hydrodynamique très différent : même aux faibles teneurs en eau, le sol Dieri reste toujours beaucoup plus perméable que le sol Dior. En comparant les courbes de conductivité hydraulique reportées figures 7 et 11, et en utilisant les mêmes unités (mm/j), on notera que les conductivités du sol Dieri et du sol Dior valent respectivement :

1 700 mm/j	et	20 mm/j	pour	$\theta = 0{,}2$
48 mm/j	et	0,1 mm/j	pour	$\theta = 0{,}1$.

En conséquence le ressuyage gravitaire du sol Dieri sera, pour toute teneur en eau, beaucoup plus rapide que pour un sol Dior ; l'infiltrabilité et la profondeur de pénétration, bien plus grande ; et, si l'on essaye d'utiliser les concepts agronomiques, la capacité de rétention et la réserve utile, beaucoup plus faibles. On peut déjà estimer qu'avec ce type de sol la recharge des réserves profondes (en cas de pluie ou d'irrigation) sera importante, les pertes par évaporation assez faibles. Le sol Dieri peut aussi être cultivé en pluvial : les pluies en général sont limitées dans cette zone (moins de

150 mm en 1977 et autour de 300 en moyenne) ; les cultures pluviales pratiquées ont une grande profondeur possible d'enracinement (mils, niébé)... ce qui peut pallier la trop forte perméabilité de ces sols ; compte tenu du relief et de la bonne perméabilité, l'aspersion y est très intéressante, à condition de la maîtriser parfaitement : doses pas trop fortes (moins de 40 mm) apportées aux intervalles de temps voulus, sans excès et avec un bon suivi de la profondeur humectée, pour éviter les gaspillages d'eau par percolation. Les vents et la très forte demande évaporative font effectivement que le goutte à goutte est une technique intéressante (économie de l'eau et forts rendements), mais pour des cultures à grands écartements seulement, compte tenu des frais d'installation (bon pour vergers et tomates en lignes jumelées écartées de 2 m, mais pas pour les aubergines et oignons par exemple).

Au contraire, dans le cas du sol Dior, l'évolution des profils hydriques en ressuyage contrôlé obtenue figure 9 montre que l'équivalent de la capacité de rétention (ici environ 0,15) et la réserve utile (environ 100 mm d'eau par mètre de sol) ont des valeurs suffisamment fortes pour permettre une culture ptuviale intensive, qui est d'ailleurs largement développée sur ce type de sol.

Une autre application importante et moins empirique des résultats obtenus dans cet article nous semble être la détermination directe du bilan hydrique, et notamment des percolations en profondeur. C'est une information primordiale pour l'estimation des réserves souterraines utilisables et qui, dans la majorité des cas, est évaluée d'une façon tout à fait subjective.

Trois années successives de mesures à Bambey, sur sol nu, désherbé, ont conduit à montrer qu'à la cote $z = 150$ cm, on a en *permanence* un gradient hydraulique voisin de — 1. Dans ce cas, le flux à ce niveau vaut simplement :

$$q = K(\theta) .$$

Si l'on connaît la courbe $K(\theta)$ *mesurée à 150 cm* (fig. 11), il suffit de suivre l'évolution des teneurs en eau à la cote $z = 150$ pour déterminer les flux, et la lame d'eau s'écoulant à travers ce niveau vers le bas. La cote du plan de flux nul (sur *sol nu*) n'ayant jamais dépassé 80 cm, on peut estimer que cette lame échappe à l'évaporation et sert uniquement à reconstituer les réserves de la nappe.

A partir des mesures de teneurs en eau effectuées sur le site de mai 1975 à novembre 1976 (fig. 17), on a d'abord remplacé la courbe lissée $\theta(t)$ par une fonction en escalier. Aux valeurs moyennes de $\overline{\theta}$ ainsi obtenues ont été affectées les valeurs de K d'après la courbe $K(\theta)$ du niveau considéré, ce qui donne les flux moyens pendant la durée de l'échelon. En multipliant ce flux par la durée de l'échelon, on obtient la lame écoulée ; ainsi pour la période du 8.10 au 12.11.75 (35 jours), on a $\overline{\theta} = 0{,}165$, soit $K = 0{,}9$ mm/j, ce qui donne un flux $q = -K \cdot \frac{dH}{dz} = 0{,}9$ mm/j et une lame d'eau de 31,5 mm. On notera que pour la période du 8.10.75 au 4.06.76, ce calcul donne une lame infiltrée de 35 mm, à comparer à 80 mm par la méthode de calcul des stocks (tabl. 3). Ce qui est un bon contrôle de la méthode.

Il est important de noter que, sur le site et pour la période considérée, la lame d'eau rechargeant les couches profondes est 261 mm pour une pluie de 841 mm, soit 31 p. 100 de la pluie.

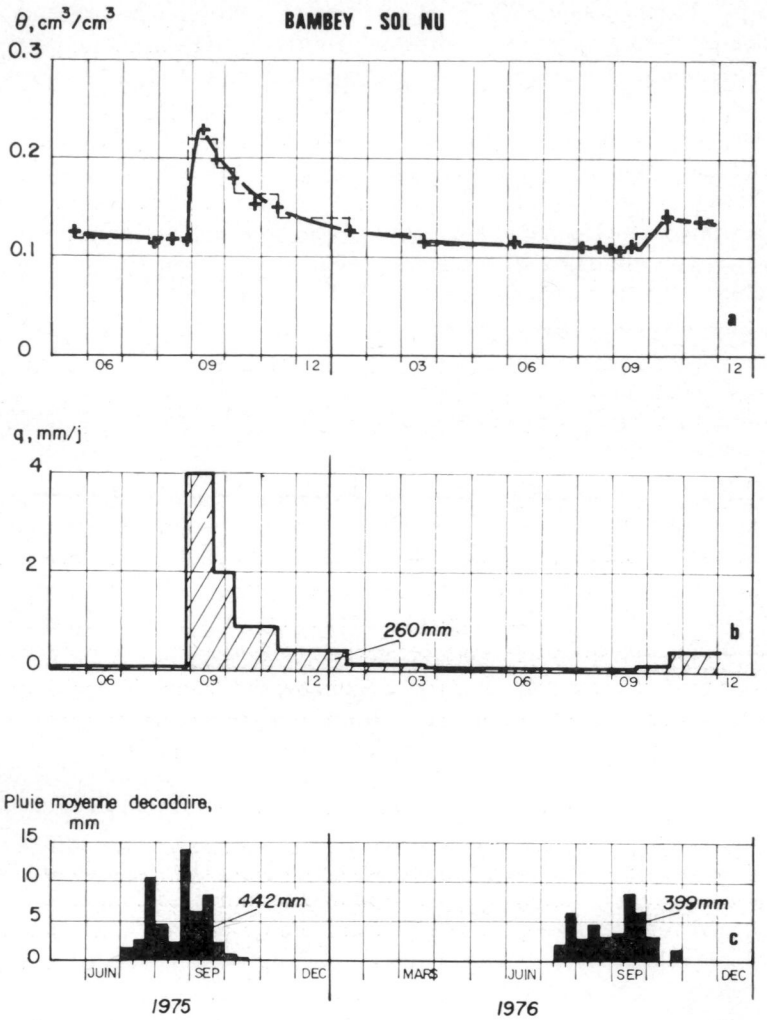


FIG. 17. — *Evolution de la teneur en eau dans des conditions naturelles à la cote* z = 152 cm *sur le site* B2 (fig. 17*a*) *de mai* 1975 *à décembre* 1972 *et évolution comparative du flux percolant à travers la cote* z = 150 cm (fig. 17*b*) *et de la pluviométrie moyenne décadaire durant la même période* (17*c*).

Il y a cependant lieu d'être très prudent à ne pas généraliser hâtivement ce résultat.

D'une part il apparaît clairement, figure 17, que pour un site donné la valeur de la lame infiltrée dépend de l'importance et de la répartition de la pluie ; d'autre part, cette détermination n'est que très ponctuelle. Un effort statistique très important, s'inspirant des travaux de Warrick *et al.* (1977) reste à faire pour mettre au point, à partir d'un grand nombre de mesures, un outil statistique permettant de prendre en compte la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol. Enfin il faut insister sur le fait que durant la période de référence aucune reprise par évapotranspiration n'a eu lieu. Les résultats seraient très différents sur un sol en jachère.

Outre l'intérêt pratique qu'il représente dans la quantification de la lame d'eau écoulée à travers une certaine cote, cet exemple nous semble également important pour l'estimation de l'évaporation réelle ou de l'évapotranspiration réelle. Dans la majorité des applications agronomiques, on suppose en effet implicitement que le flux d'eau est nul à partir du moment où les profils hydriques ne varient plus. On calcule alors l'évapotranspiration réelle en utilisant seulement les mesures neutroniques et en supposant que l'ETR correspond à la variation du stock. Ceci n'est pas nécessairement vrai. En profondeur il peut exister comme dans le cas étudié, une zone de régime permanent où la teneur en eau est constante mais où il existe un gradient de charge unitaire : le calcul de l'ETR est alors de ce fait surestimé. Si l'on connaît la relation $K(\theta)$, il suffit d'avoir en profondeur deux tensiomètres entourant une cote de mesure de teneur en eau pour déterminer le sens et la grandeur du flux à travers cette cote par application de la loi de Darcy, donc le volume écoulé pendant un certain temps. Ceci permet, par bouclage du bilan, d'avoir la valeur exacte de l'ETR (Daudet et Vachaud, 1977). Cette méthode permet également, en associant à la mesure de la teneur en eau à la cote de contrôle une mesure de concentration en soluté, de déterminer et de contrôler les pertes en masse en substances minérales.

Enfin la connaissance des relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$ peut également permettre d'obtenir directement à partir de mesures de bilan sous culture, l'extraction racinaire par tranche de sol. Cette information fondamentale pour la mise au point de variétés mieux adaptées au climat et au sol doit donner lieu à une prochaine publication.

Les résultats obtenus lors de cette étude doivent maintenant faire l'objet d'un nouveau programme de recherche où l'on s'efforcera d'allier simulation numérique et mesure en station agronomique. Dans l'évolution actuelle de la recherche dans ce domaine, il apparaît en effet que les méthodes de simulation numérique sont un outil complémentaire indispensable pour aider les agronomes à mieux orienter leurs recherches (en portant notamment leur attention sur les paramètres les plus sensibles), à appliquer plus judicieusement leurs résultats (notamment dans le sens d'une extrapolation à d'autres types de sol et de climat), et enfin à économiser le nombre d'essais lourds. D'un autre côté les physiciens ont besoin d'un support permettant de tester la validité globale des modèles numériques. De nombreux codes de calcul sont maintenant disponibles pour simuler le comportement du système sol-plante-atmosphère (Hillel et Talpaz, 1976 ; Feddes *et al.*, 1976 ; Vauclin *et al.*, 1976) en attendant de pouvoir le prédire. Ces codes nécessitent tous, entre autres, la caractérisation du sol en tant que réserve hydrique (au sens dynamique), par les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$. Nous envisageons maintenant d'utiliser ces codes dans le programme de recherches pour une meilleure économie de l'eau actuellement poursuivi par l'ISRA avec les impératifs suivants :

- satisfaction des besoins hydriques des cultures en vue d'une productivité accrue ;
- maintien d'une réserve hydrique, utilisable à diverses fins, dans la zone d'enracinement utile des cultures annuelles ;
- reconstitution des réserves profondes du sol.

Ces objectifs peuvent être recherchés et atteints grâce à l'amélioration et la sélection du matériel végétal cultivé, au choix des rotations et des techniques de culture sèche. Dans l'immédiat la collaboration que nous avons l'intention de poursuivre portera essentiellement sur les points suivants :

— étude physique de l'influence du travail du sol et mise au point de techniques optimales (mulch, paillage, labour, etc...) en vue d'une réduction de l'évaporation ;

— élaboration d'un modèle de prévision d'extraction racinaire et d'évapotranspiration en vue d'aider agronomes et généticiens à définir les types de variétés les mieux adaptées au sol et au climat avec la plus faible utilisation d'eau possible.

Il nous paraît néanmoins fondamental de continuer également, dans la ligne de cette recherche, afin d'obtenir, au moins à un niveau de référence, le plus grand nombre de données possibles sur les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$ pour avoir des grandeurs spatialement représentatives, qui puissent être utilisées pour caractériser des systèmes à grande échelle.

Les méthodes décrites dans cet article s'appliquent surtout pour un sol sableux. Il serait illusoire d'essayer la méthode du drainage interne sur un sol peu drainant. Dans ce cas la méthode du bilan naturel peut être préférable. Il est cependant nécessaire de mettre encore au point une technique de caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols lourds *in situ*, et il nous semble fondamental d'inciter d'autres recherches sur ce point.

Reçu pour publication en mars 1978.

Summary

Field determination of the hydraulic characteristics of an unsaturated soil
Application on two typical soils of Republic of Senegal
with an example to the calculation of the water balance

This paper deals with practical application of two methods used to determine on the field the unsaturated soil hydraulic characteristics. The first method, called « internal drainage method », is based on the monitoring of drainage of a soil profile, following a constant head infiltration, when evaporation from the soil surface is prevented. The second method, called « natural balance method », is based on the monitoring of change of water storage in the soil under natural evaporation and percolation. For both methods it is necessary to use simultaneously neutron probe and tensiometers measurements. These methods have been applied with success on two typical soils of Republic of Senegal : a dune sand and a loess type sand. In the last part of the paper, an example showing the interest of knowing the soil hydraulic conductivity and the soil water pressure is developed. The deep drainage is computed for a period of 18 months including two rain seasons. It is shown that up to 30 p. 100 of the total rainfall can recharge the soil reservoir below a depth of 150 cm, for the case of bare soil.

Zusammenfassung

Methoden für die wasserdynamische Bestimmung eines ungesättigten Bodens in situ
Anwendung auf zwei senegalische Bodenarten zur Begriffsbestimmung
der Wasserbilanzverhältnisse

Es werden zwei Methoden für die Bestimmung der wasserdynamischen Eigenschaften eines ungesättigten Bodens durch direkte Messung *in situ* beschrieben. Die erste, sogennannte « innerliche Entwässerung », besteht aus der regelmässigen Beobachtung der Bodentrocknung nach der Versickerung einer gewisse Wassermenge ohne Verdunstung an der BodenoberFläsche. Die zweite Methode, sogenante « Bilanz », besteht aus der Beobachtung der Veränderungen der Bodenwasserreserve während der natürlichen Verdunstungsperiode nach einer durch Regen bewirkten Durchfeuchtung. Die zwei Methoden beruhen auf dem gleichzeitigen Einsatz einer Neutronensonde und einer Reihe

von Tensiometern und auf der Auswertung der Messungen. Sie wurden auf zwei für Senegal typischen Bodenarten angewandt : ein Dünensand-boden und ein Windschuttboden. Im letzten Teil des Beitrags wird auf die Bedeutung der Kenntnis dieser Grössen verwiesen, indem eine Methode für die Berechnung der Wiederherstellung der Tiefreserven während 18 Monaten anegeben wird. Diese Wiederherstellung kann bis zu 30 p. 100 der Niederschlagsmenge (für zwei Überwinterungen) über dem Kartenpunkt 150 cm hinaus auf einer Parzelle unbewachsenes Bodens darstellen.

РЕЗЮМЕ

Методы гидродинамического охарактеризования in situ ненасыщенной почвы.

Г. ВАШО, К. ДАНСЕТТ, С. СОНКО, Ж. П. ТОНИ.

Рассматриваются два метода определния гидродинами-ческих характерностей ненасыщенной почвы, с помощью прямого измерения in situ. Первый из них носит название « внутренний дренаж » и состоит в прослеживании осушения почвы, после проникновения вала влаги, без испарения. Второй метод, метод « баланса », основан на наблюдении над эволюцией запаса влаги в почве, в период природного испарения, после увлажнения дождями. Оба метода основаны на одновременном применении нейтронного зонда и серии тенсиометров, с последующим анализом измерений. Применялись эти два метода в двух разных типах почв, характерных для Сенегаля : песчанная почва дюн и почва нанесенная ветром. В заключительной части работы рассматриваются интерес полученных величин и методика вычисления пополнения водных запасов в течении 18-ти месянного периода. На делянке голой почвы, без растительности, пополнение это, на глубине превышающей 150 см. может представить до 30 р. 100 дождей (за два з мних периода).

Références bibliographiques

BELL J. P., MAC CULLOCH J. S. G., 1966. Soil Moisture estimation by the neutron scattering method in Britain. *J. Hydrology*, **4,** 254-263.

CHARREAU C., 1963. Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *Agro. Trop.*, **19** (11).

CHARREAU C., NICOU R., 1971. Amélioration du profil culturel dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine, et ses incidences agronomiques. *Agro. Trop.*, **26** (2, 5, 9 et 11).

COUCHAT P., CARRE C., MARCESSE J., LEHO J., 1975. Measurement of thermal neutron constant of the soil : Application to the calibration of neutron moisture gauges and to the pedological study of the soil. *Proc. Conf. Nuclear Data Cross Sections on Technology*, Washington DC. March 1975.

COUCHAT P., 1977. Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. *Ann. agron.* **28** (5), 477-488.

DANCETTE C., 1970. Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. Intérêt agronomique de cette mesure et application à la culture d'arachide. *Agro. Trop.* **25** (3).

DAUDET F. A., VACHAUD G., 1977. La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Ann. agron.* **28** (5), 503-519.

FEDDES R. A., KOWALIK P., KOLINSKA-MALINKA K., ZARADNY H., 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *J. of Hydrology* **31,** 13-26.

HILLEL D., KRENTOS V. D., STILIANOU Y., 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. *Soil Sci.* **114,** 395-400.

HILLEL, D., 1973. *Soil and Water, Physical Principles and Processes*, 288 p., édité par Academic Press, New York.

HILLEL D., TALPAZ H., 1976. Effect of root growth parameters on the pattern of soil moisture extraction by non-uniform root systems. *Soil Sci.* **121,** 307-312.

MOREL-SEYTOUX H. J., 1973. Pour une théorie modifiée de l'infiltration. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologique* **X,** 185-194.

NIELSEN D. R. *et al.*, 1972. *Soil Water*, 175 p., édité par American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

PIERI C., 1975. Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. Rapport Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques, soumis pour publication. *Agro. Trop.*

ROYER J. M., VACHAUD G., 1974. Détermination directe de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succions. *Hydrological Sci. Bull.* **XIX,** 319-336.

SMILES D. E., 1974. Infiltration into a swelling material. *Soil Sci.* **117,** 140-147.

TYANO B., 1976. *Hydrodynamique sur sol sableux Dior.* Thèse de Maîtrise ès Sciences, Dept. de Génie Rural, Université de Laval, Québec.

VACHAUD G., THONY J. L., 1970. Hysteresis effects during infiltration and redistribution in a soil column at different water contents. *Water Resources Res.*, USA **7,** 111-127.

VACHAUD G., GAUDET J. P., KURAZ V., 1974. Air and water flow during ponded infiltration in a vertical bounded column of soil. *J. of Hydrology* **22,** 89-108.

VAUCLIN M., HAVERKAMP R., VACHAUD G., 1975. Transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Simulation et prévision. Proc. of a meeting on « *Efficiency of water and fertilizer use in semi-arid region* ». Bambey, Sénégal, nov. 75. Publié par I.A.E.A., Vienne, 195-213.

WARRICK A. W., MULLEN G. J., NIELSEN D. R., 1977. Scaling field measured soil hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resources Res.*, **13.**

WATSON K. K., 1966. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resources Res.*, USA **2,** 709-715.

Ann. agron., 1978, **29** (1), 37-57.

Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relation avec la dynamique de l'eau Eléments d'analyse d'un système carbonaté

G. CALLOT, H. CHAMAYOU * et M. DUPUIS

Service d'Etude des Sols, I.N.R.A.,
** Laboratoire de Science du Sol, E.N.S.A.,*
34050 *Montpellier Cedex*

Résumé

A partir d'études expérimentales, les auteurs mettent l'accent sur les grandes variations du pH obtenues sur divers matériaux carbonatés, en fonction de la dilution et de la dimension des particules calcaires, à pCO_2 et température constantes.

Ces variations de pH régies par les cinétiques de dissolution du carbonate de calcium dans le système $CaCO_3$-H_2O-CO_2, sont en fait plus dépendantes de la dilution (fonction de la porosité des matériaux) et de la dimension des éléments carbonatés que des teneurs effectives en calcaire.

Le sol calcaire, en particulier, doit être considéré comme un système dans lequel les équilibres géochimiques sont instables. Ces équilibres, réglés en partie par les interfaces des phases solide/liquide/gaz, sont en relation directe avec la dynamique de l'eau dans le sol et les cinétiques de dissolution du carbonate de calcium et du CO_2.

Introduction

La notion de pH en sol calcaire ne semble pas faire l'objet d'interprétations pédologique ou agronomique utiles, comme l'avait déjà fait remarquer Crahet (1967) dans son analyse bibliographique. Cette valeur dépend en fait du rapport sol/eau : en outre elle varie, à l'équilibre, en sens inverse des teneurs en matière organique, comme nous avons pu, ainsi que Le Tacon (1976), le constater au cours de l'étude de nombreux sols calcaires.

Les variations de pH d'une solution saturée en carbonate de calcium sont réglées par les équilibres du système $CaCO_3/H_2O/CO_2$ dépendant eux-mêmes des rapports entre les interfaces solide/liquide et liquide/gaz (Roques, 1964). Pour aborder l'analyse d'un tel système dans le milieu complexe du sol, nous allons suivre les diverses variations de pH de la solution :

— au cours des cinétiques de dissolution du carbonate de calcium pur (calcite) *en fonction des dimensions de particules carbonatées*, pour mettre en évidence le rôle de la dilution en phase aqueuse non circulante,

— puis par *l'étude expérimentale de divers matériaux-sols carbonatés en système ouvert* (eau circulante).

Jusqu'alors, en effet, les diverses études relatives à l'évolution du système $CaCO_3/H_2O/CO_2$ dans les sols ont été abordées en tenant compte surtout des variations des pressions de CO_2 dans l'atmosphère et la solution du sol (Yaalon, 1957 ; Gras, 1974 ; Bourrié, 1976) (1)... Nous aborderons l'étude de ce système à pCO_2 et température constantes sur des matériaux non à peu organiques, en considérant essentiellement les inter-relations qui existent entre la phase solide carbonatée, la phase gazeuse et la circulation de l'eau dans le sol.

A. — Variations du pH d'une solution en présence de diverses populations de particules carbonatées

Caractéristiques des roches calcaires utilisées

Deux échantillons de calcaire ont été retenus pour cette étude. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

Calcaire bioclastique :

— 98 p. 100 de $CaCO_3$,
— porosité à l'eau : 19 p. 100,
— Type d'arrangement cristallin : il est donné par le rapport sparite/micrite = 22/56 (0,39).

Calcite de géode :

— 99,5 p. 100 de $CaCO_3$,
— non poreuse,
— 100 p. 100 de sparite.

Ces échantillons ont été broyés, puis tamisés pour être répartis en plusieurs populations de particules carbonatées correspondant aux classes granulométriques suivantes :

— Sables grossiers : 2 000-200 μ ;
— Sables fins : 200-50 μ ;
— Limons grossiers : 50-20 μ ;
— Limons fins : 20-2 μ ;
— Argile : < 2 μ.

1. — *Variations du pH de diverses populations de particules.*

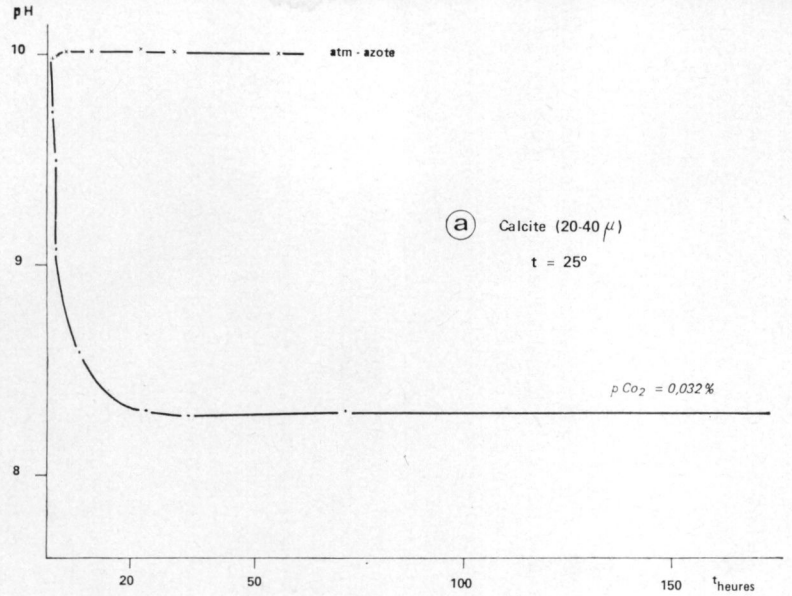
Les diverses populations de particules carbonatées provenant des échantillons précédents ont été mises en contact avec une eau bi-permutée à pH 6,4 dans les conditions suivantes :

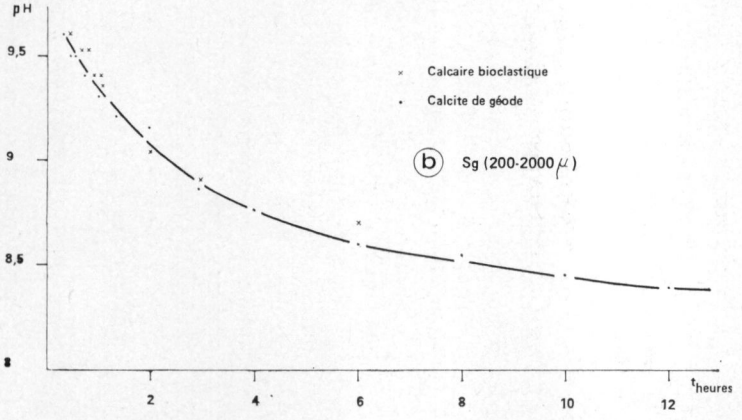
— température de l'air 20°,
— température de la solution 18-20°,
— pression de CO_2 de l'air 3.10^{-4} atm.

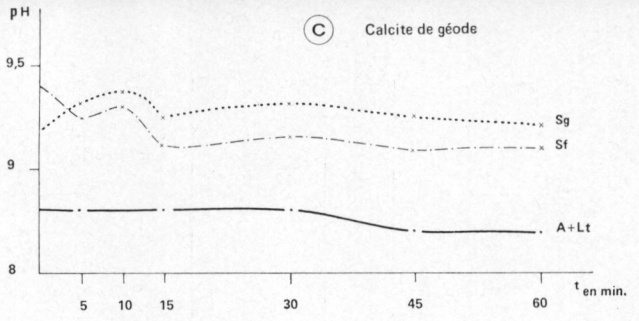
L'eau utilisée est partiellement chargée en CO_2, mais pas en équilibre avec le CO_2 atmosphérique.

---

(1) Voir également Réf. bibliographiques : Crahet, 1967.







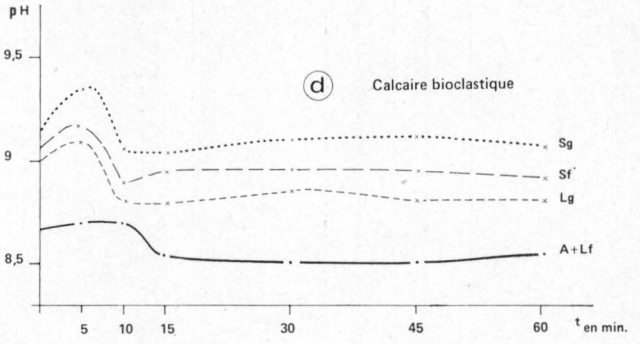


FIG. 1. — *Variations du pH en fonction du temps pour diverses populations de particules carbonatées.*

Le pH des diverses suspensions a été mesuré après agitation, dans un rapport sol/eau = 1/2,5, soit 10 g de roche dans 25 cc d'eau. D'une manière générale, pour une même roche le pH initial pris au temps t_0 varie en fonction inverse de la dimension des particules, comme on peut le constater dans le tableau 1 ci-après :

TABLEAU 1

Variations du pH en fonction des fractions granulométriques

Nature du carbonate de calcium	Fractions granulométriques en μ		pH t_0 avec agitation
Calcaire bioclastique 98 p. 100 $CaCO_3$	A + Lf	< 20	8,68
	LG	20-50	9,00
	Sf	50-200	9,06
	SG	200-2 000	9,15
Calcite de géode 99,5 p. 100 $CaCO_3$	A + Lt	< 50	8,80
	Sf	50-200	9,40
	SG	200-2 000	9,15

2. — *Variations du pH en fonction du temps.*

Le pH d'une solution de carbonate de calcium mis en contact avec l'atmosphère diminue avec le temps. La courbe (*a*) de la figure 1, établie avec la solution de calcite Merck (20-40 μ) contenant 20 g de $CaCO_3$ dans 2 l d'eau, de même que la courbe (*b*) relative à la fraction sables grossiers (200-2 000 μ) de calcaire bioclastique et de calcite de géode montrent que le pH d'équilibre (pH 8,4), est atteint au bout de 12 h sous pCO_2 atmosphérique normale à 20° environ.

Pour préciser cette cinétique de dissolution au niveau des classes de particules carbonatées, le pH des diverses populations granulométriques a été mesuré toutes les 5 mn, sous pression atmosphérique normale. Les résultats exprimés par les familles de courbes *c* et *d* de la figure 1 soulignent, d'une manière générale, une augmentation rapide dans les 5 premières minutes, passage par un maximum, descente rapide, puis la stabilisation lente s'amorce à partir de 15 mn environ. Pour toutes les classes granulométriques, le pH d'équilibre (8,4) est obtenu au bout de 12 h environ (cf. courbe *b*).

La forme des courbes, du moins dans les 15 premières minutes, est une caractéristique des types de matériaux carbonatés (rôle de l'état de surface des particules), mais aussi des dimensions de particules, courbe accentuée pour les particules grossières, aplatie pour les particules fines. D'une manière générale, les pH observés sont d'autant plus élevés que les particules sont grossières, c'est-à-dire que le rapport liquide/surface externe des particules est élevé.

Ces constatations nous ont amené à faire varier le rapport $CaCO_3/H_2O$ pour chacune des classes.

3. — *Variations du* pH *en fonction du rapport* $CaCO_3/H_2O$.

Certains échantillons ont été soumis à des dilutions croissantes. Les pH, mesurés au bout de 20 mn, augmentent régulièrement jusqu'à la dilution à 1/200 où le pH se stabilise vers une valeur de l'ordre de 9,7, quelle que soit la taille des particules. Ce pH

élevé est toutefois obtenu plus rapidement pour les sables grossiers que pour les particules fines inférieures à 20 μ (A + Lf) (cf. fig. 2).

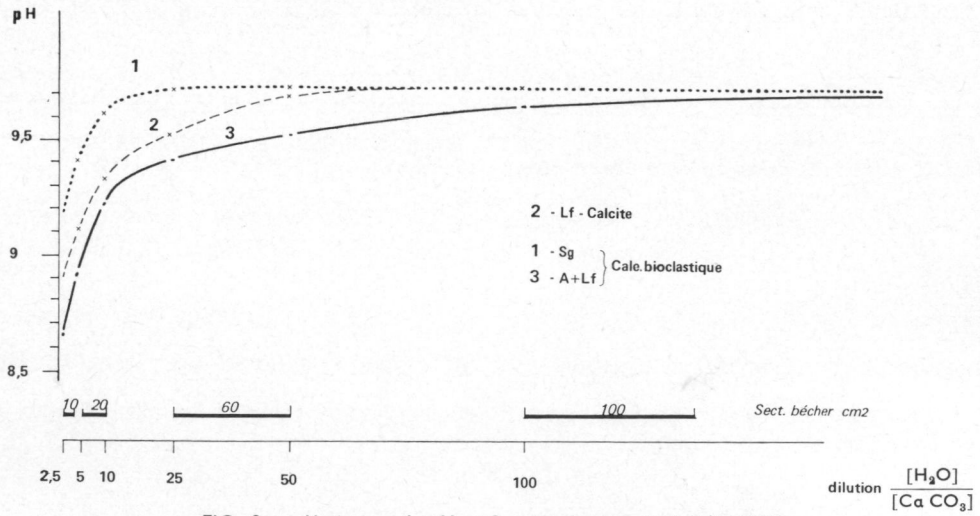


FIG. 2. — *Variations du pH en fonction du rapport* $H_2O/CaCO_3$.

Les variations de pH, en fonction du rapport $CaCO_3/H_2O$, déjà observées il y a une dizaine d'années dans des sols sableux calcaires de la vallée du Rhône, ont également été signalées par d'autres auteurs, Turner et Clark (1956) et Haas (1941) constatant, d'une manière générale, une diminution du pH lorsque l'humidité d'un sol diminuait.

4. — *Interprétation des résultats.*

a) *Considérations théoriques sur le* pH *des solutions du système* $CaCO_3/H_2O/CO_2$.

Les principaux mécanismes mis en jeu au cours des expériences précédentes font intervenir les cinétiques de dissolution du $CaCO_3$ et du CO_2 dans le système $CaCO_3$-CO_2-H_2O.

L'étude statique et cinétique de cet équilibre a déjà fait l'objet de nombreux travaux parmi lesquels on peut citer principalement ceux de Garrels et Christ (1967), Kern et Weisbrod (1964), Roques (1964) et Girou (1970).

En ce qui concerne le pH d'une solution de $CaCO_3$ en présence de CO_2, on sait que la concentration en ions H^+ résulte de l'ensemble des réactions suivantes (Garrels et Christ, 1967) :

$$CaCO_3 \rightleftharpoons CO_3^{--} + Ca^{++} \qquad \frac{[CO_3^{--}]\,[Ca^{++}]}{[CaCO_3]} = 10^{-8,3} \qquad (a)$$

$$CO_3^{--} + H^+ \rightleftharpoons CO_3H^- \qquad \frac{[CO_3^{--}]\,[H^+]}{[H^-CO_3]} = 10^{-10,3} \qquad (b)$$

$$CO_3H^- + H^+ \rightleftharpoons CO_3H_2 \qquad \frac{[CO_3H^-]\,[H^+]}{[H_2CO_3]} = 10^{-6,4} \qquad (c)$$

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^- \qquad [H^+]\,[OH^-] = 10^{-14} \qquad (d)$$

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \qquad [H_2CO_3] = 10^{-1,5}\,pCO_2\,. \qquad (e)$$

Pour déterminer le pH, il faut exprimer les concentrations des divers ions en fonction de la concentration en ions H^+, en utilisant les constantes d'équilibre, puis porter ces valeurs dans l'équation qui exprime la neutralité de la solution.

$$2[Ca^{++}] + [H^+] = 2[CO_3^{--}] + [HCO_3^-] + [OH^-] .$$

Par exemple lorsque l'équilibre est atteint, en présence d'une phase solide $CaCO_3$ et sous une pression de CO_2 égale à la pression partielle de ce gaz dans l'atmosphère ($pCO_2 = 10^{-3,5}$ atm) on commence par porter cette dernière valeur dans (*c*) :

$$[CO_3H^-] = \frac{10^{-11,4}}{[H^+]}$$

qui portée elle-même dans (*b*) donne :

$$[CO_3^{--}] = \frac{10^{-21,7}}{[H^+]^2} .$$

A l'aide de (*a*) et comme $[CaCO_3] = 1$, puisqu'on est *en présence d'une phase solide de* $CaCO_3$, on a :

$$[Ca^{++}] = 10^{13,4}[H^+]^2 .$$

Enfin (*d*) conduit à :

$$[OH^-] = \frac{10^{-14}}{[H^+]} .$$

Ces valeurs portées dans la relation générale de neutralité électrique donnent l'équation de la concentration en ions $[H^+]$:

$$10^{13,7}[H^+] + [H^+]^3 - 10^{-11,4}[H^+] = 10^{-21,4} .$$

Puis, par une résolution par approximations successives de cette équation, on obtient :

$$[H^+] = 10^{-8,4}$$

d'où

$$pH = 8,4 .$$

A l'aide de la relation : $[Ca^{++}] = 10^{13,4}[H^+]^2$ on peut déterminer la concentration en ions Ca^{++}

$$[Ca^{++}] = 10^{13,4} . 10^{-16,8} = 10^{-3,4} \text{ mole/l}$$

ou encore :

$$[Ca^{++}] = 16 \text{ mg/l} .$$

La quantité de $CaCO_3$ qui a été dissoute est donc :

$$[CaCO_3] = 10^{-3,4} \text{ mole/l} \quad \text{ou} \quad [CaCO_3] = 40 \text{ mg/l} .$$

On peut par conséquent associer au pH de la solution un rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$ qui dans ce cas particulier est égal à $10^{1,6}$ ou en prenant le log $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$ la valeur 1,6.

Les calculs de pH et de concentration en Ca^{++} ou de masse de $CaCO_3$ dissoute, faits pour diverses pressions partielles de CO_2, ou encore de concentrations en H_2CO_3 de la solution, aboutissent aux valeurs données dans le tableau suivant (tabl. 2).

TABLEAU 2

PCO_2 atm.	$[H_2CO_3]$ moles/l	Sans phase solide $CaCO_3$	Présence d'une phase solide $CaCO_3$					
		pH	$[Ca^{++}]$ en mg/l	$[CaCO_3]$ en mg/l	$[CaCO_3]$ mole/l	$\frac{[CaCO_3]}{[H_2CO_3]}$	$\log \frac{[CaCO_3]}{[H_2CO_3]}$	pH
0	0	7	4	10	10^{-4}			9,95
$10^{-5,5}$	10^{-7}	6,7	4	10	10^{-4}	10^{3}	3	9,7
$10^{-4,5}$	10^{-6}	6,2	10	25	$10^{-3,6}$	$10^{2,4}$	2,4	9
$10^{-3,5}$	10^{-5}	5,7	16	40	$10^{-3,4}$	$10^{1,6}$	1,6	8,4

Ces valeurs montrent que le pH est fonction du rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$ et qu'il augmente quand ce rapport augmente.

Dans les mesures de pH qui ont précédé, l'équilibre de l'eau avec le CO_2 atmosphérique n'a été atteint qu'au bout de 12 à 20 h environ lorsqu'on atteint le pH de 8,4. Avant ce stade, le système $CaCO_3/H_2O/CO_2$ n'est pas à l'équilibre et le pH dépend essentiellement de $[H_2CO_3]$, la concentration de $[CaCO_3]$ variant peu comme on le voit sur le tableau 2 précédent. Le pH augmente lorsque la $[H_2CO_3]$ diminue, c'est-à-dire lorsque la quantité d'eau augmente, puisque la pCO_2 atmosphérique est constante.

b) *Variations du* pH *en fonction du temps.*

D'une manière générale, les diverses familles de courbes montrent une augmentation du pH dans les premières minutes jusqu'à un maximum, puis une décroissance régulière jusqu'au pH 8,4, pH d'équilibre de la calcite — obtenu au bout de 12 h environ — sous pression atmosphérique normale.

La partie ascendante de la courbe correspondrait à une vitesse de dissolution du carbonate de calcium dans l'eau supérieure à celle du CO_2 atmosphérique. Le maximum correspond à la valeur maximale du rapport $[CaCO_3]/H_2CO_3]$. La décroissance exprimerait la diminution du rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$, donc la dissolution plus rapide de CO_2 atmosphérique, par rapport à $CaCO_3$. La forme des courbes obtenues résulte en fait de la combinaison des courbes de dissolution du $CaCO_3$ et du CO_2 atmosphérique dans l'eau (réactions du premier ordre).

La forme des courbes (*c* et *d*, fig. 1) relatives aux cinétiques de dissolution des différentes classes granulométriques diffère pour la calcite de géode, non poreuse à phénocristaux, de celle du calcaire bioclastique poreux à micrite et sparite. Pour une même classe granulométrique, la dissolution est plus rapide pour le calcaire bioclastique, par suite d'un état de surface formé d'une mosaïque de petits cristaux plus solubles. Le rôle de l'état de surface des particules vis-à-vis des cinétiques de dissolution sera abordé dans des travaux ultérieurs.

c) *Variations du* pH *en fonction des populations de particules.*

D'une manière générale, on peut constater sur l'ensemble des courbes (*c*) et (*d*) de la figure 1 que, pour chaque type de roche, le pH est d'autant plus élevé que les particules sont plus grossières et ceci au temps t_0 aussi bien que pendant la première heure des expériences. Le volume d'eau étant constant, la *concentration en* $[H_2CO_3]$ de l'eau bi-permutée utilisée est *sensiblement la même* pour toutes les grosseurs de parti-

cules, les différences de pH ne devraient s'expliquer que par des différences de dissolution de $CaCO_3$. Généralement, les particules fines étant plus solubles que les grosses, on devrait être amené à penser que le pH d'une solution de particules fines de calcite soit plus élevé que celui d'une solution de sables grossiers; or, on constate le contraire. En fait, pour la calcite, les différences de solubilité en fonction des dimensions de particules sont faibles et cette valeur peut être considérée comme constante. On est donc amené à supposer que les différences de pH initial au temps t_0 en fonction des classes granulométriques sont dues aux différences de $[H_2CO_3]$. Or la concentration en $[H_2CO_3]$ de l'eau utilisée étant sensiblement constante, il faut admettre que les variations de $[H_2CO_3]$ au temps t_0 de l'expérience proviennent de la *présence de* CO_2 *adsorbé autour des surfaces externes des particules*.

Les particules fines offrant une grande surface externe auront beaucoup de CO_2 adsorbé, ce qui induira par là même une forte concentration en $[H_2CO_3]$ donc un pH relativement bas ; inversement, les sables grossiers offrant des surfaces externes plus faibles auront peu de CO_2 adsorbé, donc développeraient une faible $[H_2CO_3]$ et, par là même, un pH de départ plus élevé, ce que l'on peut généralement constater dans la plupart des cas des figures 1 (*c*) et (*d*).

Sans entrer dans les considérations théoriques relatives aux mécanismes d'adsorption de cette phase gazeuse autour des particules solides et en supposant que l'adsorption ait lieu sous forme d'une monocouche, on est amené à penser que dans le cas des fractions granulométriques ayant un diamètre inférieur à 4 ou 5 μ, il existe suffisamment de CO_2 pour amener dès le départ la solution carbonatée à l'équilibre, équilibre que l'on obtient pour les autres classes granulométriques au bout de 12 à 20 h environ.

En fait, tout se passe comme si au départ la concentration en $[H_2CO_3]$ était dépendante du pCO_2 atmosphérique et du CO_2 adsorbé sur les différentes particules, puis, au bout de 12 à 20 h, l'équilibre de la suspension carbonatée est réglé uniquement par la pCO_2 atmosphérique.

d) *Variation du* pH *en fonction du rapport* $H_2O/CaCO_3$.

Les courbes de la figure 2 sur lesquelles on constate une augmentation du pH en fonction du rapport $H_2O/CaCO_3$ (dilution) s'expliquent aisément. Les variations de pH étant fonction du rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$, la dilution d'une suspension carbonatée dans l'eau entraîne une augmentation du rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$ liée au fait que la diminution des concentrations en $[CaCO_3]$ est plus faible que la diminution des concentrations en CO_3H_2 lorsqu'on ajoute de l'eau pure, comme on peut le constater dans le tableau 2.

B. — Variations du pH de divers matériaux carbonatés en fonction du drainage

Au cours de l'analyse de nombreux sols calcaires, nous avons toujours constaté, pour des teneurs en carbonates assez voisines, une relation inverse entre le pH de la solution du sol (1) et la teneur en matière organique, ce qui s'explique par la diminution du rapport $CaCO_3/H_2CO_3$, la matière organique produisant en effet beaucoup

(1) pH à l'équilibre en phase eau non circulante.

de CO_2. Pour ne pas trop s'écarter des expériences précédentes où le taux de CO_2 était celui de l'atmosphère, *nous avons choisi pour la nouvelle série expérimentale des échantillons peu ou pas humifères* (teneurs en matière organique inférieures à 0,5 p. 100).

En revanche, nous avons retenu des matériaux présentant une large gamme de variations texturales, de porosités et de teneurs en carbonates totaux, afin de mieux saisir l'effet de la dilution.

Nombre de ces matériaux peu humifères proviennent d'horizons du sous-sol (roche calcaire broyée) ou d'horizons sous-culturaux. Les caractéristiques physiques et les teneurs en carbonates des divers échantillons sont données dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Caractéristiques des matériaux de sol

Ref.		Nature des matériaux	Granulométrie terre fine p. 100					$CaCO^3$		MO p. 100	pH eau 1/2,5	Drainage	
			SG	SF	LG	LF	A	total	actif			pH max.	cc/s débit
1	Matériaux de sous-sol	Sables et graviers de calcaires durs	84,5	4	4	2	5,5	92	4	0,10	8,7	9,3	20
2		Craie broyée < 2 mm .	5,5	18	54	6	15,5	81	30	0,10	8,6	9	0,07
2 *bis*		Craie grossière de 2 mm à 6 mm						78,6	32		8,4	9,3	20
3		Molasse de l'Agenais (Sable calcaire grossier)	67,5	13,5	2,5	10,5	6	22	6,5	0,16	8,6	9,3	C. M. R.
4		Sable calcaire dunaire	24	73	1,5	0,5	1,5	38	2	0	8,8	10,1	6,6
6		Idem dilué avec 5/6 de sable grossier quartzeux	77	21	—	0,5	0,5	11,7	1,5	—	8,4	9,3	25
7		Idem dilué avec 49/50 de sable grossier quartzeux	97,5	2,5	—		0	3,2	1	—	7,8	9 9,85	29 0,007
8		Marne à attapulgite	11	12	3	24	50	87	11,5	0,4	8,4	8,7	0,2
9	Matériaux de sol	Rendzine noire sur marne à attapulgite	21	6	1,5	30	39	66,5	10,5	2,3	8,05	9,15	C. M. R.
10		Argile rouge et cailloutis calcaire (Horizon B de sol rouge calcaire de terrasse)	41	13	5,2	6,6	32	30	10,5	1,6	8	8,3	2
11		Sable argileux calcaire (Horizon B/C de sol sur grès calcaires)	5	77	4	7	7	15	5	0,4	8	8,2	0,4
12		Limon argileux calcaire (Horizon B de sol brun calcaire).....	3,5	5	15	27	47,5	7,7	3,5	2,5	7,85	7,8	0,05

C. M. R. : Capacité maximale de Rétention pour l'eau.

Dispositif expérimental (fig. 3)

Les échantillons de matériaux sont placés dans une allonge de 25 cm de hauteur et 8,5 cm de diamètre (56,7 cm² de section). Une électrode double de mesure de pH plonge dans le matériau où l'on fait circuler de l'eau en maintenant un niveau constant.

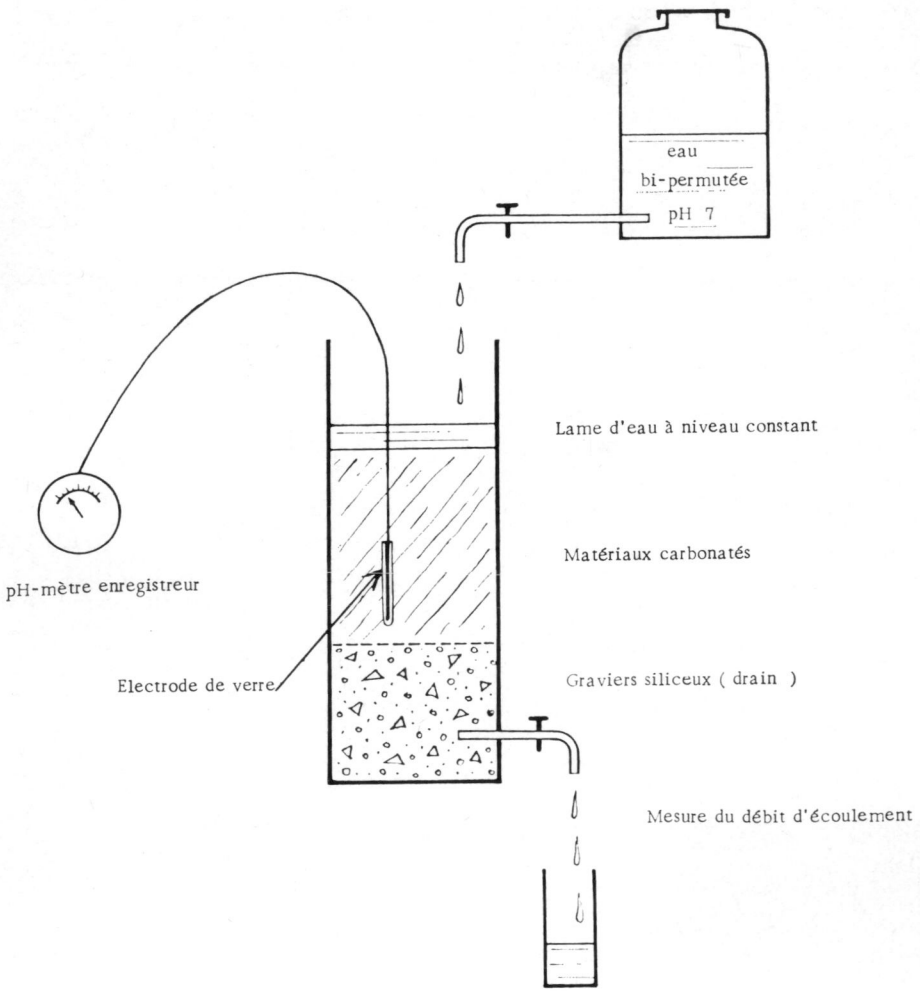


FIG. 3. — *Schéma du dispositif expérimental.*

Le pH est mesuré en fonction du temps, pour un débit déterminé.

Pour les matériaux peu perméables, une trompe à vide permet d'augmenter le débit.

La trompe à vide est d'ailleurs utilisée dans tous les cas pour ressuyer rapidement le matériau à la fin de l'expérience de drainage.

Les résultats obtenus montrent que des variations importantes du pH ont été enregistrées dans tous les cas, sur un même matériau, non seulement en fonction de sa nature et de sa teneur en carbonate de calcium, mais surtout de sa texture et de sa porosité, qui règlent l'humidité et le drainage. Nous allons maintenant envisager les résultats dans les différents cas.

1. — *Evolution du* pH *de matériaux très calcaires.*

Trois types de matériaux très calcaires ont été utilisés : des graviers, des craies broyées et une marne.

a) *Graviers calcaires* (fig. 4*a*).

Ils sont constitués par des grains faiblement poreux, dont plus de 80 p. 100 sont du

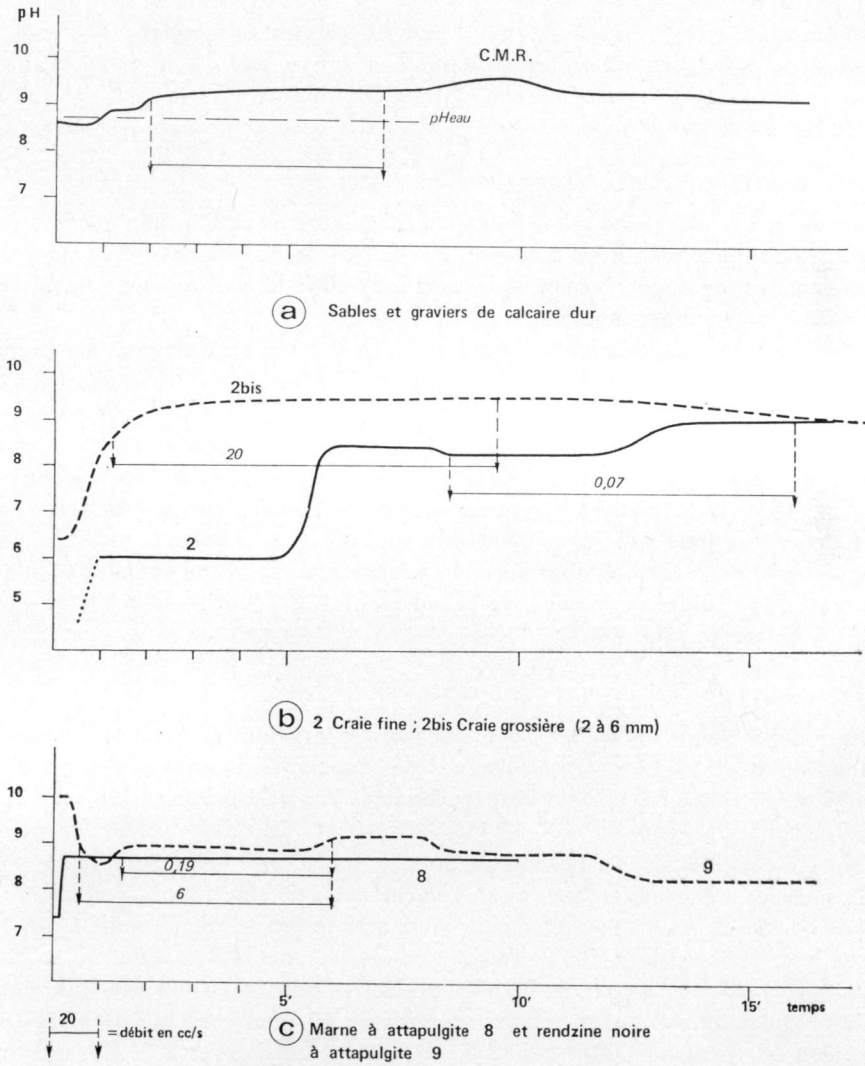


FIG. 4. — *Evolution du pH de matériaux très calcaires en fonction des vitesses de filtration.*

calcaire. L'ensemble est très filtrant. La vitesse de filtration est de l'ordre de 0,3 cm/s. Dans ces conditions, on constate une montée très rapide du pH à 9,4, le drainage favorisant la dissolution du $CaCO_3$ par rapport à celle du CO_2.

b) *Craies broyées* (fig. 4*b*).

On note un comportement très différent entre les deux populations de craie :

— dans l'échantillon formé de fragments poreux de taille comprise entre 2 et 6 mm, la vitesse de filtration est grande, de l'ordre de 0,3 cm/s. La montée du pH est rapide au cours de la filtration. Il atteint 9,3 (2 *bis*) ;

— dans l'échantillon formé de fragments plus fins (2), la montée du pH a lieu par paliers ; elle est plus lente, sans doute à cause de la grande quantité de CO_2 retenue par la surface des particules. La vitesse de filtration est lente, de l'ordre de $1{,}5.10^{-3}$ cm/s. En exerçant une force de succion de 0,3 atm, on accélère la vitesse de filtration et on extrait en même temps l'air piégé dans le sol. La quantité de CO_2 diminue et de ce fait, le rapport $[CaCO_3]/[H_2CO_3]$ augmente et le pH, qui est au départ de 8,4, monte jusqu'à 9,6.

c) *Marne très calcaire à attapulgite* (fig. 4*c*).

On note que le pH prend immédiatement la valeur d'équilibre 8,4 indépendante de la vitesse de filtration qui est d'ailleurs très faible, de l'ordre de 3.10^{-3} cm/s. Ce comportement est analogue à celui de la calcite ayant la dimension de l'argile que nous avons étudiée précédemment (fig. 1*c*, A + Lt).

Par contre, cette même marne contenant de la matière organique et présentant une forte porosité (rendzine noire (9)) conduit à des variations de pH très rapides en fonction du drainage.

Ainsi, tant que le drainage est important, la cinétique de dissolution du calcaire l'emporte sur celle du CO_2 et le pH augmente. Au ressuyage, l'humidité diminue et le CO_2 dégagé par la matière organique devient prépondérant, le pH baisse. La matière organique joue dans deux directions opposées : en améliorant la structure, elle augmente la perméabilité, donc permet une remontée du pH au cours de la phase de drainage ; par contre au moment du ressuyage, le CO_2 dégagé sature la solution et fait alors baisser le pH.

2. — *Evolution du* pH *de matériaux calcaires sableux, filtrants.*

Des mesures de pH ont été effectuées sur trois échantillons de matériaux sableux résultant d'un mélange de sable quartzeux et de carbonates. Ils contiennent respectivement 38 p. 100, 11 p. 100 et 3 p. 100 de carbonates totaux. Les vitesses de drainage, dans ces échantillons, sont élevées : 0,1 à 0,4 cm/s.

Dans ces conditions de fort drainage, malgré la grande vitesse de dissolution de $CaCO_3$, seuls les matériaux *à fortes teneurs en carbonate* de calcium peuvent atteindre des pH *élevés*. On constate, en effet, que le sable à 38 p. 100 de calcaire atteint pH 10, alors que le matériau à 11 p. 100 de calcaire conduit à un pH 9 et celui à 3 p. 100 de calcaire correspond à un pH de 8,6 (fig. 5). Certes dans ces deux derniers matériaux, le pH peut atteindre des valeurs voisines de 10, mais ceci de manière très fugace, lors du ressuyage, c'est-à-dire à un moment où la vitesse de filtration est plus faible.

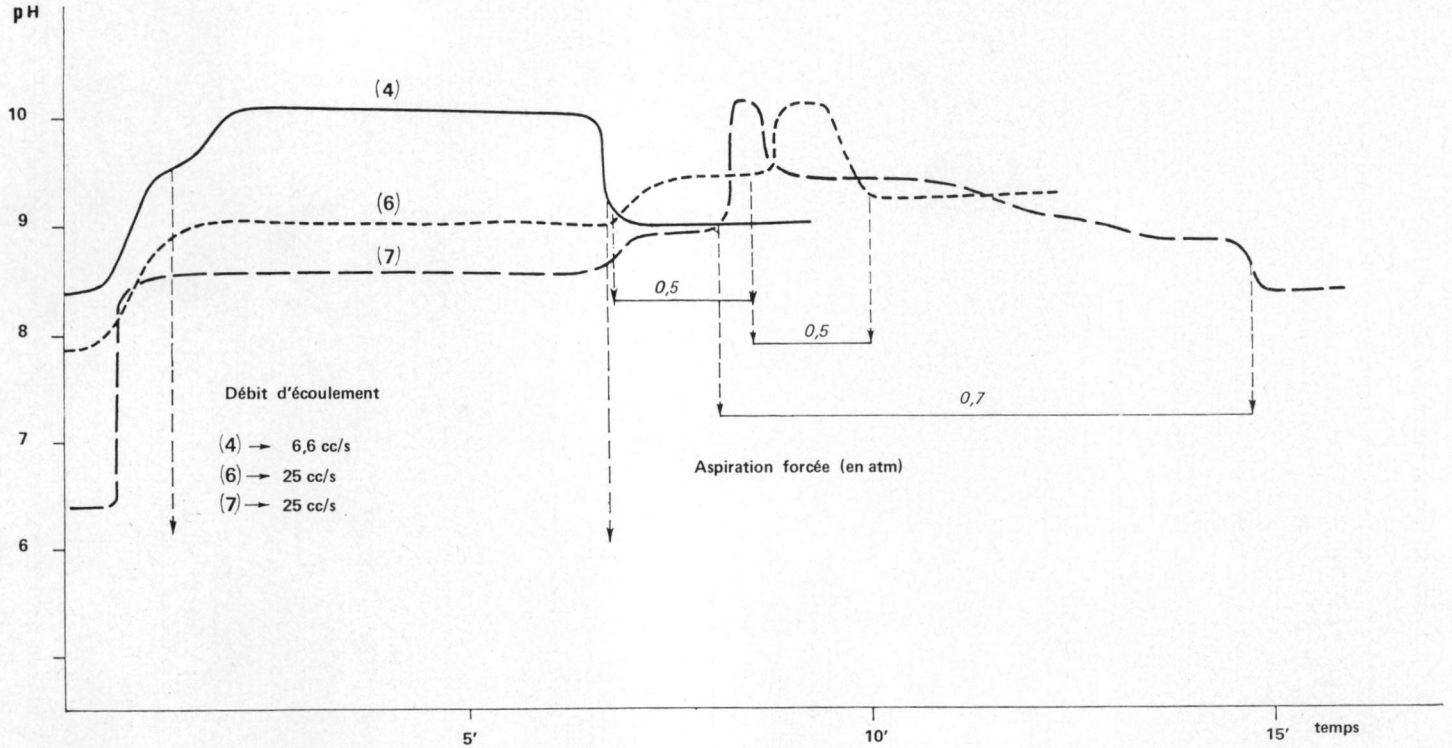


FIG. 5. — *Evolution du pH de matériaux calcaires, sableux et filtrants en fonction des vitesses de filtration.*
Teneurs en $CaCO_3$: (4) = 38 p. 100 ; (6) = 11 p. 100 ; (7) = 3 p. 100.

3. — *Evolution du* pH *de matériaux provenant de sols calcaires.*

A côté des matériaux précédents, trois échantillons de sols calcaires ont été soumis au même processus expérimental.

Dans ces sols, les vitesses de filtration sont assez faibles (de 0,2 à 2.10^{-2} cm/s). Elles permettent donc une dissolution du CO_2, ce qui empêche le pH de monter.

Effectivement les pH enregistrés sont assez bas (8 maximum) pour l'échantillon n° 12 avec une vitesse de filtration de $0{,}2.10^{-2}$ cm/s, un peu plus élevés (8,4) pour les deux autres échantillons et pour des vitesses de filtration de l'ordre de 1 à 3.10^{-2} cm/s (cf. fig. 6). *Mais dans tous les cas les* pH *obtenus en percolation restent toujours supérieurs aux* pH-*eau mesurés selon le protocole classique.*

4. — *Conclusions sur les résultats de la série expérimentale matériau/sol.*

A partir des résultats précédents, on peut récapituler les pH obtenus en fonction des vitesses de filtration (tabl. 4 et fig. 7).

TABLEAU 4

Expression du pH en fonction des matériaux et vitesse de filtration

Matériaux	Vitesse de filtration K en cm/s	pH associés à K
Limons calcaires	10^{-2}	8,4
	3.10^{-2}	8,4
	2.10^{-3}	8
Sables calcaires	10^{-1}	10
	4.10^{-1}	9
Graviers calcaires	3.10^{-1}	9,4
Craies		
— grossières	3.10^{-1}	9,3
— fines	2.10^{-3}	8,4
Marnes	3.10^{-1}	8,4

L'obtention de pH très élevé de l'ordre de 10 s'obtient dans des situations de drainage pour lesquelles les percolations d'eau non chargé de CO_2 se font suffisamment lentement pour que les particules calcaires aient le temps de saturer la solution en calcium. Il faut par contre que cette vitesse ne soit pas trop lente pour que CO_2 atmosphérique n'ait pas le temps de se dissoudre. Il s'agit d'un régime d'écoulement optimum réglé dans la nature, par le drainage régional, fonction de la topographie et de la porosité du matériau.

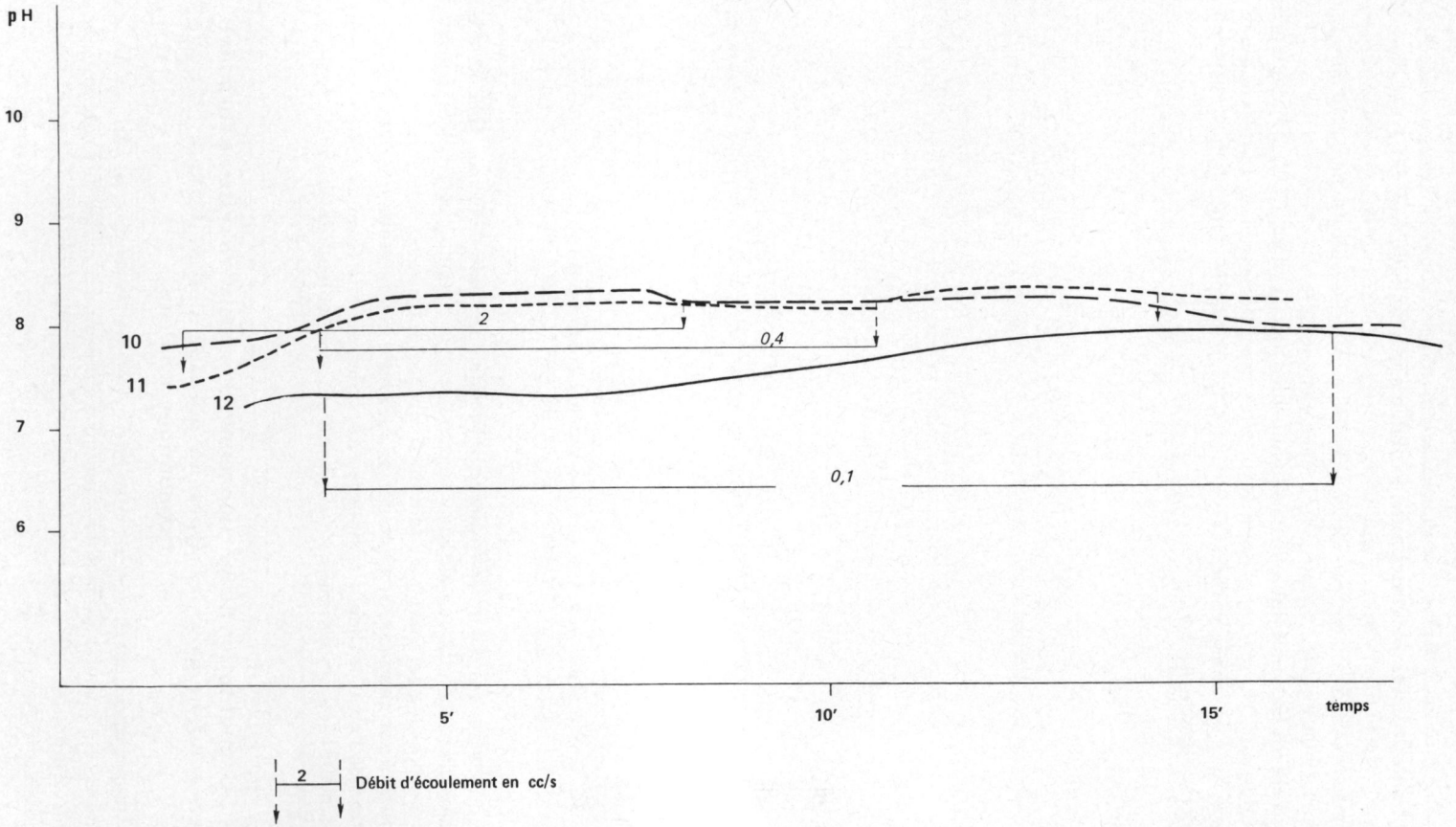


FIG. 6. — *Evolution du pH de matériaux provenant de sols calcaires* (Horizon B). (10) : limon argileux d'horizon B de sol fersiallitique recarbonaté ; (11) : sable argileux d'horizon (B) C de sol brun calcaire ; (12) : limon argileux d'horizon B de sol brun calcaire.

La droite B de la figure 7 souligne une diminution de pH en relation avec l'augmentation des vitesses de filtration et s'explique par le fait que dans ces types de matériaux grossiers et très filtrants, l'eau ne se sature pas en Ca^{++} au cours de l'infiltration. Dans *certaines situations une eau circulant dans un matériau calcaire peut donc être sous-saturée en calcium si les vitesses de filtration sont grandes.*

Dans le cas des matériaux fins, de la taille des argiles (droite A, fig. 7), les vitesses de filtration sont très lentes par suite de la faible porosité, les solutions restent alors en équilibre avec la phase carbonatée et le pCO_2 atmosphérique, le pH reste alors constant de l'ordre de 8,4.

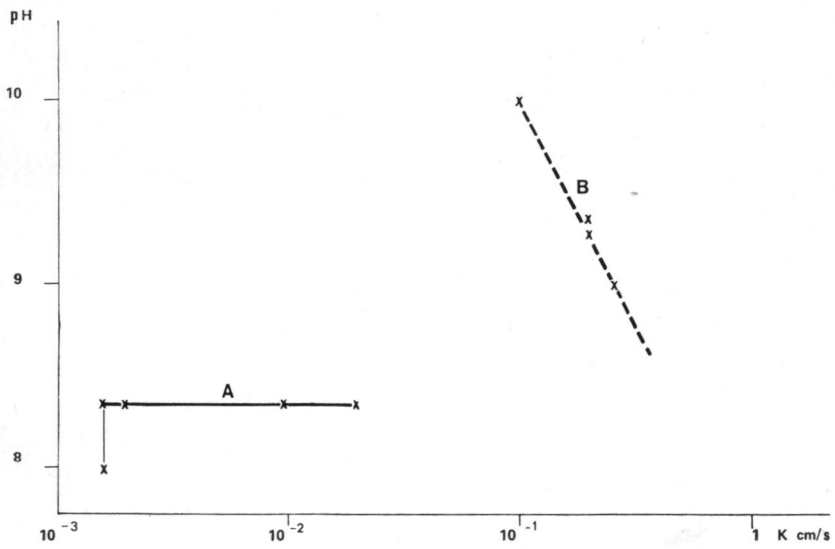


FIG. 7. — *Variation de pH de matériaux calcaires en fonction des vitesses de filtration.*
A : matériaux fins ; B : matériaux grossiers poreux.

En définitive, ces quelques résultats expérimentaux montrent très nettement que sur le plan physico-chimique les caractéristiques physiques d'un sol calcaire (texture structure, porosité, perméabilité) sont plus importantes que les teneurs en carbonate de calcium. Pour chaque type de matériaux il existe donc, en fonction des vitesses de circulation de l'eau, des seuils critiques susceptibles de maintenir un pH élevé dans la solution du sol (ce pH est toujours supérieur à celui obtenu en laboratoire — dilution 1/2,5).

C. — Schématisation du fonctionnement général d'un système carbonaté en relation avec les types de porosité des matériaux et la dynamique de l'eau

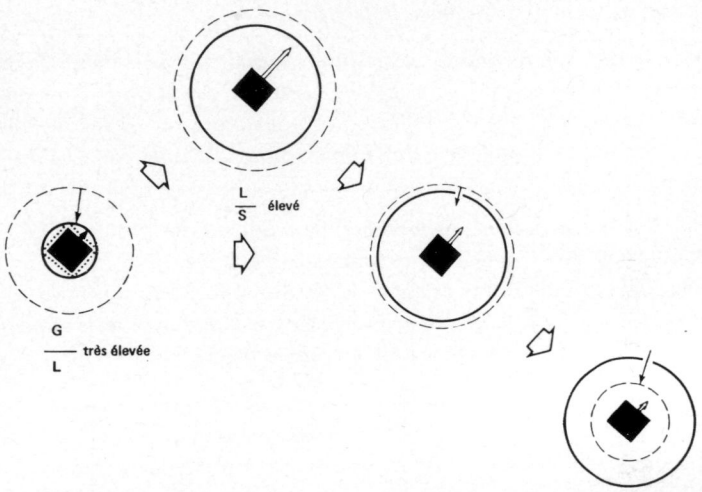
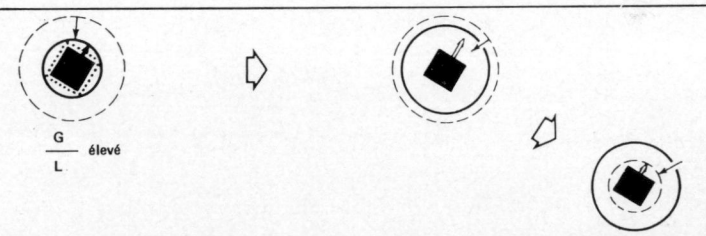
L'interprétation des différents résultats expérimentaux obtenus, au niveau des populations de particules carbonatées comme au niveau des matériaux calcaires, nous amène à symboliser les inter-relations qui existent entre les trois phases gazeuse,

liquide et solide dans le tableau 5 ci-après. Cette symbolisation suppose que les échanges qui règlent les équilibres se font essentiellement par l'intermédiaire de la phase liquide, ce qui semble logique dans notre système sol/solution.

TABLEAU 5

Schématisation du fonctionnement d'un système carbonaté en relation avec la dynamique de l'eau.

(*Errata* : au lieu de Co_2, Co_3, lire CO_2, CO_3)

Milieu / Type de porosité	Milieu non saturé	Milieu saturé d'eau		
		Écoulement rapide	Écoulement lent	Eau non circulante
Porosité globale élevée macroporosité				
Porosité globale microporosité				
Concentrations	$\frac{[Co^3Ca]}{[Co^3H2]} \leqslant 10^{1,6}$	$\frac{[Co^3Ca]}{[Co^3H2]} = 10^{3}$	$\frac{[Co^3Ca]}{[Co^3H2]} \geqslant 10^{1,6}$	$\frac{[Co^3Ca]}{[Co^3H2]} = 10^{1,6}$
pH	$\leqslant 8,4$	> 9	8,4 – 9	8,4
Phases	G *gazeuse* : *Co₂ atm*, *Co₂ adsorbé*	L *liquide* : *eau circulante*	S *solide* : *surface des particules*	
Types d'échanges	*diffusion de Co₂ atm*	*diffusion de Co₂ adsorbé*	*dissolution de Co₃ Ca*	

Les principaux mécanismes mis en jeu dans ce système sont les suivants :

1) Dissolution du CO_2 adsorbé sur les surfaces des particules carbonatées réglant les $[H_2CO_3]$ du départ donc le pH de départ ;

2) Dissolution du $CaCO_3$ qui tend à élever le pH ;

3) Dissolution du CO_2 atmosphérique qui tend à ramener le pH vers l'équilibre à 8,4.

Dans ce milieu, toujours saturé en $CaCO_3$, les variations de pH résultant des interréactions entre ces trois phases sont sous la dépendance des concentrations en H_2CO_3, réglées en majeure partie par les échanges gazeux aussi bien au niveau du CO_2 adsorbé à la surface des particules que par le CO_2 atmosphérique.

Ces constatations nous amènent donc à distinguer des sous-systèmes bien différents réglés *surtout par le type de porosité.*

— *Système à macroporosité élevée*, dans lequel les particules carbonatées sont généralement grossières, avec de faibles surfaces spécifiques ; *milieu filtrant, aéré*, dans lequel les échanges entre les phases liquides et gazeuses seront fluctuants, en relation avec le régime de l'eau, d'où variations importantes et rapides du pH, avec possibilité de pH très élevés.

— *Système à microporosité importante*, dans lequel les particules carbonatées sont généralement fines, avec une grande surface spécifique ; *milieu peu filtrant, peu aéré* dans lequel les variations des interfaces gaz/liquide sont faibles, d'où stabilité du pH.

Compte tenu de la faible solubilité du $CaCO_3$, *le milieu reste toujours saturé en* $CaCO_3$ *donc dans ce système, la teneur en carbonate présente une importance secondaire.*

A l'intérieur de ce système, présenté de manière dynamique faisant intervenir une interprétation cinétique de phénomènes de dissolution, nous n'avons pas pris en compte les périodes de résidence durant lesquelles les variations de pCO_2 liées à la présence de matière organique et à l'activité biologique viennent encore modifier les échanges.

Conclusions

Cette étude expérimentale préliminaire, relative aux cinétiques de dissolution du carbonate de calcium et du gaz carbonique dans le système $CaCO_3/H_2O/CO_2$, met en évidence l'importance des variations de pH susceptibles d'intervenir dans un sol calcaire, indépendamment des teneurs en carbonates totaux ou actifs. Elle exprime en fait que le sol est un système hétérogène, dans lequel les équilibres thermodynamiques sont en perpétuelle évolution sous l'interaction des trois phases solide/liquide/gazeuse. Ces variations importantes de pH de la solution d'un sol, évoluant entre 5,7 et 10,2 en domaine calcique et calcaire, en fonction de la dynamique de l'eau rejoignent certains aspects mis en évidence dans la dynamique du profil salin étudié par Servant (1975) et sont susceptibles d'intervenir également dans des matériaux plus acides, où nous avons pu constater des variations de pH évoluant entre 3,4 et 6,4 selon l'importance du drainage.

Ces premiers éléments relatifs à l'évolution en milieu carbonaté mettent l'accent sur le fait qu'il n'existe pas de relation directe entre la phase carbonatée d'un sol et ses

caractéristiques physico-chimiques (concentration en ions). Il faut, pour comprendre les divers mécanismes de dissolution, prendre en considération les surfaces des phases solides en même temps que les problèmes de circulation d'eau et d'air dans le profil. Le régime des eaux dépendant surtout de la texture et des systèmes de porosité du matériau, sera d'ailleurs variable selon les niveaux du profil : apports essentiellement verticaux et ruissellement de surface dans les horizons supérieurs du sol, apports obliques et hypodermiques dans les horizons du sous-sol.

Sur le plan pédologique, ces résultats expérimentaux expriment la possibilité d'obtenir des pH très élevés, voisins de 10, en milieu calcaire, pH susceptible de solubiliser en particulier la silice et l'alumine. Ils montrent également l'importance de la dynamique et du régime de l'eau dans les sols, éléments qui devraient être pris en compte à un niveau élevé dans la classification des sols, puisqu'ils sont à même de mieux rendre compte du fonctionnement ; il en est de même de la texture et la structure (porosité du sol).

Sur le plan agronomique, il serait souhaitable de mieux relier certains tests analytiques aux caractéristiques hydro-dynamiques et aussi au régime de l'eau dans le sol, la solubilisation des divers éléments fertilisants étant en fait dépendante de la quantité d'eau qui circule. Les échanges entre les trois phases seront très différents lorsque l'on considère les réactions à l'équilibre dans les conditions habituelles de l'analyse en laboratoire, ou bien en cinétique comme cela se produit dans la nature.

Enfin, les variations extrêmes et rapides de pH de la solution, rencontrées dans certains sols calcaires pourraient expliquer non seulement des anomalies de fertilisation mais aussi certains comportements physiologiques des plantes (chlorose en particulier), comme Juste et Pouget (1967) l'avaient déjà pressenti, au cours d'expériences sur l'absorption du fer par les racines de vigne.

Reçu pour publication en mars 1978.

Remerciements

Ces recherches sont menées en relation avec le Groupe d'Etude des Géosystèmes Carbonatés et nous tenons à remercier MM. A. Girou de l'INSA Toulouse et L. Humbert de l'Institut de Géodynamique de Bordeaux III, pour leur aimable collaboration, de même que G. Pédro, Science du Sol, INRA Versailles pour ses remarques et conseils et M. Bresse du Laboratoire de Microscopie électronique de l'USTL de Montpellier.

Summary

Variations of the pH *in the solution of calcareous material as related to water dynamics*
Data for the analysis of a carbonate system

With experimental studies as basis the authors put a stress on the important pH variations obtained on various carbonate material as related to the dilution and size of the calcareous particles at constant pCO_2 and temperature. These pH variations ruled by the kinetics of the calcium carbonate dissolution in the $CaCO_3$-H_2O-CO_2 system are in fact more dependent on dilution (a function of the material porosity) and on the size of the carbonate elements than on the real contents in limestone.

The calcareous soil in particular must be considered as a system in which the geochemical equilibrium is unstable. This equilibrium partly ruled by the interfaces of the solid/liquid/vapour phases is directly linked with the water dynamics in soil and the dissolution kinetics of calcium carbonate and CO_2.

Zusammenfassung

Anderungen des pH-werts der Lösung von kalkhaltigen Materialien gemäss der Wasserdynamik
Grundlagen für die Analyse eines carbonierten Systems

Von experimentellen Untersuchungen ausgehend Obetonen die Autoren die grossen pH Änderungen, die auf verschiedene carbonierten Materialien in Zusammenhang mit der Verdünnung und der grösse der Kalkteilchen unter konstanten pCO_2 und Temperatur erreicht worden sind.

Diese ph Änderungen, die durch die Kinetik der Zersetz ung von kohlensaurem Kalk in das $CaCO_3$-H_2O-CO_2 System hervongerufen werden, hängen tatsächlich mehr von der ver dünnung (Ergebnis der Materialporosität) und der grösse der carbonierten Elemente als vom tatsächlichen jeweiligen Kalkgehalt ab.

Der Kalkboden besonders muss als ein System mit labilen geochemischen Gleichgewichten betrachtet werden. Diese Gleichgewichte, die teilweise durch die Zwischen zustände der fest/flüssig/gasartig Phasen bestimmt sind, stehen in direktem Zusammenhang mit der Wasserdynamik im Boden und der Kinetik der Zersetzung des kohlensauren Kalks und des CO_2.

РЕЗЮМЕ

Изменения pH раствора известковых материалов, в связи с динамикой влаги.

Г. КАЛЛО, Г. ШАМАЮ, М. ДЮПЮИ.

На базе экспериментального изучения, рассматриваются сильные изменения pH, наблюдавшиеся в различных карбонатных материалах в зависимости от разбавления и размеров известковых частиц, при p CO_2 и постоянной температуре.

Эти изменения управляются кинетик ой растворения углекислого кальция в системе $CaCO_3$-H_2O-CO_2 и, в действмтельности, больше зависят от разбавления (в связи с порозностью материала и размерами карбонатных материалов), чем от эффективных содержаний кальция.

Известковую почву, в частности, необходимо рассматривать как систему находящуюся в состоянии непрочных геохимических равновесий, частично управляющихся внутренней стороной твердых/жидких/газообразных фаз, и находящихся в прямом соотношении с динамикой влаги в почве и кинетикой растворения углекислого кальция и CO_2.

Références bibliographiques

BOURRIE G., 1976. Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO_2 dans les eaux naturelles. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol., Sci. Sol*, 141-160.

CRAHET M., 1967. Le pH des sols calcaires. Etude bibliographique. *Bull. Assoc. fr. Etud. sol*, 4, 17-67, pp. 17-67.

DEDEK J., 1966. *Le carbonate de chaux*. Librairie Universitaire. Louvain, 352 p.

DUPUIS M., 1975. La répartition granulométrique des carbonates dans les sols. *Bull. Assoc. fr. Etud. sol, Sci. Sol*, 4, 249-269.

GARRELS R. M., CHRIST C. L., 1967. *Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses*. Paris, Librairie Gauthier-Villars, 335 p.

GIROU A., 1970. *Etude de la cinétique de précipitation des carbonates de calcium en phase aqueuse*. Thèse, Faculté des Sciences de Toulouse.

GOUJON G. G., 1975. *Etat de surface de la calcite en solution aqueuse. Valeur de l'énergie interfaciale. Influence d'additifs*. Thèse, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, Marseille.

GRAS F., 1974. Application d'une méthode expérimentale à la détermination du pH et de la solubilité du carbonate de calcium dans les sols calcaires. *Sci. Sol*, 1, 33-48.

HAAS A. R. C., 1941. The pH of soils at low moisture content. *Soil Sci.*, **51**, 17-39.

HUMBERT L., 1976. *Eléments de pétrologie dynamique des systèmes calcaires*. Tomes 1 et 2. Edition Technip.

JUSTE C., POUGET R., BRUZAN, 1967. Influence du pH et de l'anion bicalcique sur l'absorption du fer par des racines de vigne. *C. R. Acad. Sc.* Paris., **264,** 2781-2784.

KERN R., WEISBROD A., 1964. *Thermodynamique de base pour minéralogistes, pétrographes et géologues.* Masson et Cie, 244 p.

LE TACON, 1976. *La présence de calcaire dans le sol. Influence sur le comportement de l'Epicea commun et du Pin noir d'Autriche.* Thèse Inst. Nat. Polytech. Lorraine.

PÉDRO G., 1972. Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. *Bull. Assoc. fr. Etud. sol, Sci. Sol,* n° spécial, 5-18.

ROQUES H., 1964. *Contribution à l'étude statistique et cinétique des systèmes* CO_2-H_2O-$CaCO_3$. Thèse n° 228, Faculté des Sciences, Toulouse.

SERVANT J., 1975. *Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France.* Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

SOUMET-DELAIGUE D., 1976. *Incidence du faciès pétrographique de quelques roches calcaires sur leur susceptibilité à la dissolution.* Thèse de 3e Cycle. Option Pédologie. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

TURNER R. C., CLARK J. S., 1956. The pH of calcareous soils. *Soil Sci.* **82** (4), 337-341.

YAALON D. H., 1957. Problems of soil testing on calcareous soils. *Plant and Soil* **8,** 275-288.

Ann. agron., 1978, **29** (1), 59-78.

Le pyranomètre sélectif : étude de ses possibilités d'utilisation dans le domaine agronomique et dans celui de la pollution atmosphérique

A. BAILLE, R. GUICHERD * et Marie MERMIER

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*
* *C.E.N.G., Laboratoire des Méthodes nouvelles de mesures des rayonnements,*
38000 *Grenoble*

Résumé

Cet article présente les résultats de mesures de rayonnement dans les trois gammes UV, visible et infrarouge, obtenues au moyen d'un pyranomètre sélectif, appareil conçu initialement pour la mesure de « l'indice d'éclairement ». Pendant une période de 2 mois, cet appareil a été testé sur le terrain dans les conditions d'exploitation. Les comparaisons des résultats fournis par cet appareil, soit avec d'autres mesures de rayonnement, soit avec les valeurs fournies par le calcul, montrent sa fiabilité ainsi que sa bonne précision dans les gammes visible et infrarouge. En particulier, il est possible d'utiliser cet appareil pour des applications telles que la détermination de la fraction utile à la photosynthèse. Les erreurs expérimentales semblent par contre plus élevées dans la gamme ultra-violet, et sont dues sans doute aux calories parasites qui n'ont pu être entièrement éliminées.

Les indices d'éclairement calculés à partir de ces mesures présentent une forte dépendance par rapport aux conditions d'ennuagement et au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. En dehors des périodes de beau temps, il semble difficile d'utiliser ces indices pour caractériser le niveau de pollution global d'un site. Par contre, sur de longues périodes, ces indices permettraient peut-être de déterminer les tendances et les variations à long terme du niveau de pollution.

I. — Introduction

Dans la première partie d'un article concernant le trouble atmosphérique (Baille et Mermier, 1977), nous avons présenté les premiers résultats concernant les mesures et la caractérisation du trouble atmosphérique en zone semi-rurale. L'inconvénient de l'utilisation des mesures de trouble pour caractériser le niveau de pollution d'une région réside dans le fait que les mesures ne peuvent être effectuées que par beau temps ou lors d'éclaircies, entre deux passages nuageux. Si cet inconvénient n'est pas trop gênant dans les régions à fort ensoleillement, il est par contre rédhibitoire dans les régions moins favorisées à ce point de vue. La trop grande discontinuité dans les mesures ne permet pas alors un suivi continu du trouble, et par voie de conséquence, de la pollution moyenne du site.

Certains auteurs ont alors pensé à utiliser des mesures spectrales du rayonnement global et du rayonnement diffus afin de déterminer, quelles que soient les conditions

météorologiques, un paramètre analogue au coefficient de trouble atmosphérique : Idso (1971), Unsworth et Monteith (1972), Yamashita (1973), Bach (1973), Guicherd (1974). En particulier, le dernier auteur cité a mis au point un appareil, appelé pyranomètre sélectif, qui permet la mesure du rayonnement global dans trois bandes spectrales bien définies (ultra-violet, visible et infrarouge) et s'est proposé, à partir de ces mesures, de définir des « indices d'éclairement » pour chaque bande, ainsi qu'un indice d'éclairement global. Nous rappelons que désormais il est obligatoire, dans certaines zones, de déterminer l'indice d'éclairement, ceci de par le décret n° 63-963 du 1er septembre 1963 pris en application de la loi n° 61-482 du 2 août 1961 relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques. Le Service des Mines n'ayant pas trouvé de définition de cet indice, il a fallu le créer de toutes pièces... La définition et la signification de ces indices seront développées plus loin dans l'article. Il faut d'ores et déjà noter que cet appareil conçu principalement par son auteur dans le but de définir des paramètres permettant de caractériser la pollution moyenne d'un site à partir de mesures de rayonnement global, présente un intérêt évident dans les recherches à orientation agronomique et bioclimatologique puisqu'il permet de définir la fraction du rayonnement solaire utile à la photosynthèse, définie par le rapport :

$$\eta = \frac{\int_{0,4\mu}^{0,7\mu} E(\lambda)\, d\lambda}{\int_{0,3\mu}^{3\mu} E(\lambda)\, d\lambda} \qquad (1)$$

où $E(\lambda)$ est l'énergie radiative comprise dans la bande spectrale $d\lambda$.

Des études théoriques et expérimentales portant sur ce sujet sont disponibles, bien qu'en nombre encore relativement restreint jusqu'ici (Avaste *et al.*, 1961 ; Mc Cree, 1972, 1976 ; Szeicz, 1974 ; Mc Cree et Keener, 1974 ; Varlet Grancher, 1975 ; Williams, 1976). Le pyranomètre sélectif offre donc *a priori* un double intérêt, d'une part du point de vue de la caractérisation de la pollution atmosphérique, d'autre part du point de vue agronomique. Nous présentons dans cet article les résultats d'une campagne de mesures de deux mois effectuée avec cet appareil sur le terrain expérimental de la Station de Bioclimatologie d'Avignon, campagne qui était destinée à tester le comportement et la fiabilité de cet appareil mis dans les conditions d'exploitation *in situ*.

II. — Les indices d'éclairement

II.1. — *Atmosphère standard de référence*

La composition spectrale et l'intensité du rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère sont stables, si on excepte les variations en intensité dues aux variations de la distance terre-soleil au cours de l'année. L'atmosphère terrestre agit comme un filtre sur le rayonnement solaire et le modifie en composition et en intensité par plusieurs mécanismes : diffusion par les molécules (effet Rayleigh), absorption sélective par les gaz, diffusion par les aérosols naturels ou anthropogéniques. Ces effets sont fonction du trajet parcouru par les rayons dans l'atmosphère et varient donc avec la hauteur du soleil. En supposant connue la composition de l'atmosphère, il est théoriquement possible, en utilisant certaines hypothèses simplificatrices, de calculer, pour

chaque valeur de la hauteur solaire et pour chaque longueur d'onde, l'effet de ces mécanismes et de déterminer les intensités respectives des rayonnements direct, diffus et global. Avaste *et al.*, en particulier, ont proposé des tables donnant les valeurs de ces différents rayonnements, par bandes spectrales étroites ($\Delta\lambda = 0{,}01\ \mu m$), pour différentes valeurs de l'épaisseur optique équivalente de l'atmosphère, τ_0 (qui tient compte en fait du contenu en aérosols), de l'épaisseur d'eau condensable, W, et de la masse d'air relative, m_r. On peut ainsi définir une atmosphère standard de référence.

L'atmosphère standard utilisée par Guicherd dans la définition des indices d'éclairement est caractérisée par les valeurs suivantes :

W, épaisseur d'eau condensable = 1 cm ;

ε, épaisseur équivalente d'ozone = 2 mm ;

β, coefficient de trouble d'Angström = 0,050.

II.2. — *Définition des indices d'éclairement*

La définition de l'indice d'éclairement telle que la propose Guicherd est la suivante : l'indice d'éclairement, pour une longueur d'onde donnée, est le rapport entre l'éclairement énergétique mesuré pour cette longueur d'onde et l'éclairement théorique calculé pour la même longueur d'onde dans les mêmes conditions de mesure, c'est-à-dire au même instant et au même lieu, en considérant l'atmosphère standard définie ci-dessus.

L'indice d'éclairement ainsi défini ne peut être universel que si tous les utilisateurs emploient les mêmes bases pour le calcul de l'éclairement énergétique théorique (même spectre solaire, même pourcentage de diffus).

On peut également définir l'indice d'éclairement par bandes spectrales et l'indice d'éclairement global de manière analogue.

Avec un pyranomètre sélectif, quatre indices d'éclairement peuvent donc être calculés ; un indice d'éclairement global, I_T, et les indices d'éclairement I_{UV}, I_{VI} et I_{IR} correspondant respectivement aux trois gammes ultra-violet, visible et infrarouge, Soient R_{UV}, R_{VI}, R_{IR} et $R_T = R_{UV} + R_{VI} + R_{IR}$ les énergies radiatives mesurées et G_{UV}, G_{VI}, G_{IR} et G_T les énergies radiatives théoriques correspondant à l'atmosphère standard. On a donc :

$$I_{UV} = \frac{R_{UV}}{G_{UV}}, \quad I_{VI} = \frac{R_{VI}}{G_{VI}}, \quad I_{IR} = \frac{R_{IR}}{G_{IR}}, \quad I_T = \frac{R_T}{G_T}. \qquad (2)$$

II.3. — *Calcul des valeurs théoriques de l'éclairement énergétique*

A partir de diverses études théoriques et expérimentales, Guicherd (1974) a proposé des formules d'approximation polynomiale qui permettent de calculer, en fonction de la hauteur solaire h, le rayonnement global dans les trois bandes spectrales choisies dans les conditions définies par l'atmosphère standard et en supposant un rapport diffus sur global égal à 0,20. Ces formules sont les suivantes :

— pour l'ultra-violet (0,3 μm-0,4 μm) :

$$G_{UV} = 105{,}8 \sin h(0{,}476 + 1{,}177\ 10^{-2}\ h - 2{,}015\ 10^{-4}\ h^2 + 3{,}019\ 10^{-6}\ h^3 - 1{,}682\ 10^{-8}\ h^4) \ ; \qquad (3)$$

— pour le visible (0,4 μm-0,72 μm) :

$$G_{VI} = 423{,}2 \sin h(1{,}046 - 1{,}049\,10^{-2}\,h + 3{,}839\,10^{-4}\,h^2 - 4{,}820\,10^{-6}\,h^3 + 1{,}984\,10^{-8}\,h^4 ; \quad (4)$$

— pour l'infrarouge (0,72 μm-3 μm) :

$$G_{IR} = 529 \sin h(0{,}667 + 9{,}739\,10^{-3}\,h - 1{,}208\,10^{-4}\,h^2 + 1{,}213\,10^{-6}\,h^3 - 6{,}853\,10^{-9}\,h^4) ; \quad (5)$$

— pour le rayonnement total (0,3 μm-3 μm) :

$$G_T = 1\,058 \sin h(0{,}800 + 1{,}850\,10^{-3}\,h + 7{,}300\,10^{-5}\,h^2 - 1{,}019\,10^{-6}\,h^3 + 2{,}827\,10^{-9}\,h^4) . \quad (6)$$

G_{UV}, G_{VI}, G_{IR} et G_T sont exprimés en $W.m^{-2}$.

On pourrait également utiliser les valeurs proposées par Avaste *et al.*, cela dans les cas où on veut utiliser une atmosphère standard autre que celle proposée par Guicherd.

III. — Description de l'appareillage expérimental

III.1. — *Description du pyranomètre sélectif*

Cet appareil est décrit en détail par son réalisateur dans sa thèse (Guicherd, 1974). Nous en donnons ici les principales caractéristiques.

Le pyranomètre sélectif est constitué de trois têtes de détection placées sur un socle en marbre. Chaque tête est constituée par un détecteur thermique surmonté de deux filtres sélectifs hémisphériques. Une double ventilation, interne et externe, assure la thermalisation de l'ensemble.

III.11. *Le détecteur* (fig. 1).

Le détecteur thermoélectrique est un transducteur. Un disque en résine époxy, d'une épaisseur de 16 mm, est revêtu sur ses deux faces de lamelles métalliques recou-

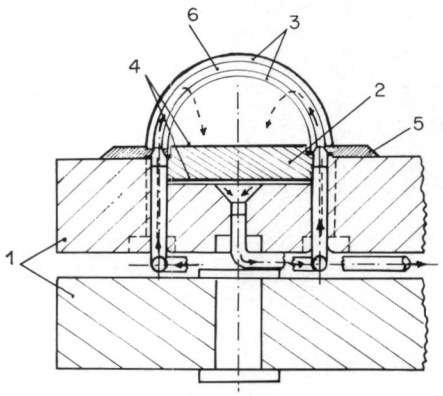
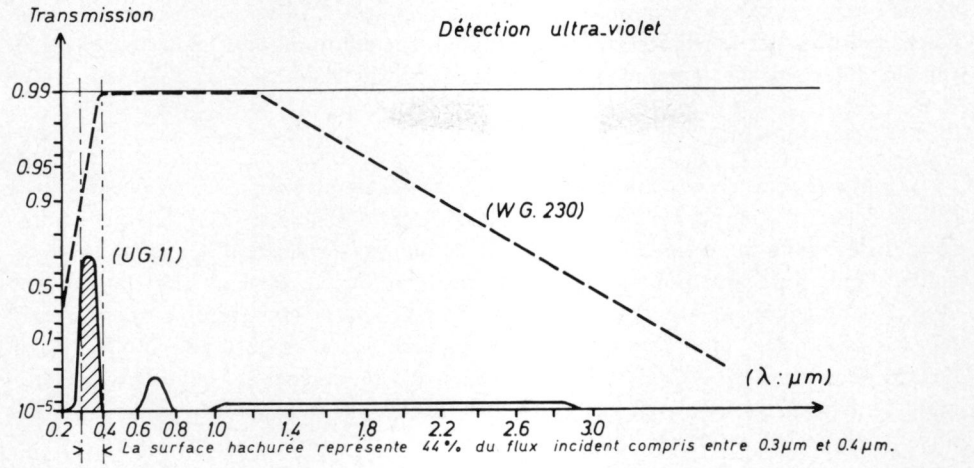
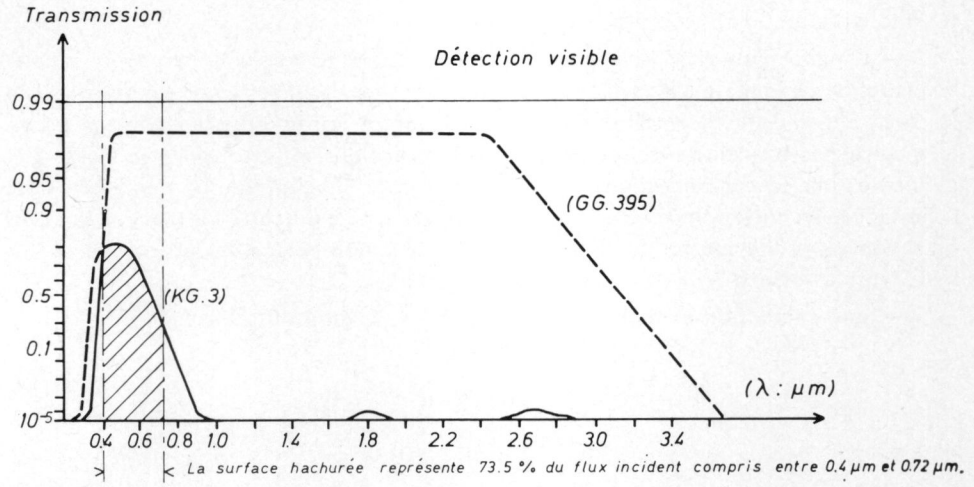


FIG. 1. — *Détails d'une tête de détection.*
1. — *Marbre*, 2. — *Transducteur*, 3. — *Filtres*, 4. — *Surfaces sensibles*, 5. — *Bague porte filtres*, 6. — *Circuit de thermalisation*





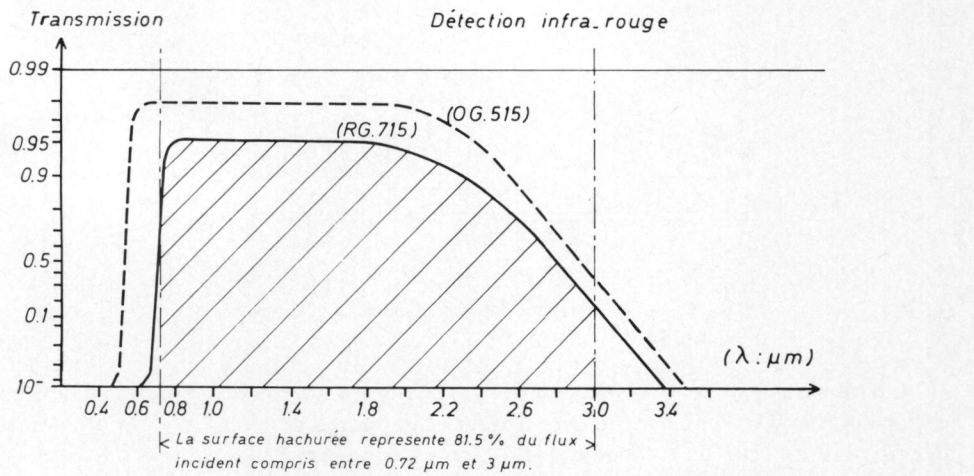


FIG. 2. — *Transmission du groupe de filtres de référence : Détections ultra-violet, visible et infra-rouge.*

vertes d'une couche de noir absorbant (anti-reflet 3M). Les lamelles servent de pont électrique pour les thermocouples manganine-constantan montés en série qui mesurent la différence de température entre les faces du transducteur.

III.12. *Optique sélective.*

L'optique sélective est constituée par deux filtres hémisphériques. Le filtre externe (filtres Schott UG11 pour l'ultra-violet, KG3 pour le visible et RG715 pour l'infrarouge) s'échauffe du fait de l'absorption du rayonnement incident. Cet effet est particulièrement important pour la tête UV, dont le filtre extérieur absorbe environ 90 p. 100 du rayonnement incident. La couche noire étant sensible à ce rayonnement thermique, il a été rajouté un filtre intérieur (filtres Schott WG230 pour l'ultra-violet, GG395 pour le visible et OG515 pour l'infrarouge), qui permet de réduire ce rayonnement d'environ 75 p. 100. La figure 2 présente les courbes de transmission des différents filtres internes et externes.

Pour supprimer à peu près complètement cet effet parasite, les deux filtres ont été thermalisés par un double système de ventilation :

— une thermalisation interne en circuit fermé avec pompe et dessiccateur, assure l'évacuation de la majeure partie des calories parasites. L'air sec circule d'abord entre les deux filtres. Cette thermalisation étant insuffisante, l'air est ensuite envoyé à la face inférieure des transducteurs, entre les soudures froides et le socle de marbre. Cet artifice assure la compensation thermique du dispositif. L'air sec parcourt alors les échangeurs en cuivre noirci logés entre les deux parties du socle de marbre qui agit ainsi comme le thermostat du système. Cette disposition permet la mise en série des trois têtes et assure leur étanchéité ;

— une ventilation externe pour la tête UV au niveau du socle.

III.2. — *L'ensemble de mesures* (fig. 3)

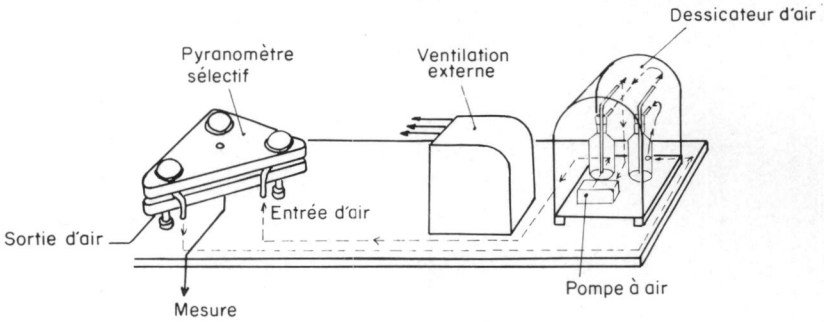


FIG. 3. — *Ensemble de mesures d'indice d'éclairement.*

L'ensemble de mesures comprenant le pyranomètre sélectif, la ventilation externe, la thermalisation interne avec le dessiccateur et la pompe de circulation est placé sur un châssis. Il est relié au système d'acquisition de données par un câble à six conducteurs blindés correspondant aux signaux délivrés par les trois têtes de détection.

Ces signaux, ainsi que ceux délivrés par d'autres appareils de mesure de rayonnement (global, diffus, direct, etc...) sont envoyés sur une chaîne d'acquisition de données Vidar-PDP8 et moyennés sur une heure. Ces données moyennes horaires sont ensuite mises sur cartes perforées et traitées sur ordinateur au moyen d'un programme de calcul (Baille, Mermier et Reich, 1976) qui permet de calculer entre autres les valeurs théoriques de l'éclairement énergétique, les différents indices cités plus haut, ainsi que les rapports entre les énergies radiatives mesurées dans chaque bande et l'énergie totale mesurée.

III.3. — *Implantation des mesures*

Les mesures ont été effectuées en continu pendant 2 mois (20 mars-21 mai 1974) sur le toit terrasse de la Station de Bioclimatologie d'Avignon (latitude 43° 55′ N, longitude 4° 51′ E, altitude 25 m). L'influence des bâtiments et des haies d'arbres environnants existe, mais ne devrait se faire ressentir qu'au lever et au coucher du soleil sur des laps de temps relativement courts.

III.4. — *Etalonnage du pyranomètre sélectif*

L'étalonnage d'un tel appareil dans les conditions naturelles est délicat. Il faudrait en effet connaître de façon précise l'énergie radiative incidente dans les trois bandes spectrales, ce qui n'est possible qu'en supposant connue la répartition spectrale exacte du rayonnement direct et du rayonnement diffus dans ces bandes. L'étalonnage a donc été réalisé en laboratoire, en utilisant une source artificielle, d'intensité et de composition spectrale connues, constituée par un projecteur à arc. (On a supposé que la répartition spectrale de l'arc dans chaque bande est analogue à celle du soleil, ce qui n'est vrai qu'en première approximation). La précision d'un tel étalonnage peut être estimée à $\pm$ 3 p. 100.

IV. — Résultats expérimentaux

Nous présentons tout d'abord les résultats des comparaisons effectuées entre le pyranomètre sélectif et un pyranomètre classique, puis quelques exemples de valeurs mesurées des énergies radiatives R_{UV}, R_{VI}, R_{IR} et R_T. Leurs valeurs absolues n'offrent en elles-mêmes que peu d'intérêt. Par contre, les rapports des différentes énergies entre elles permettent de voir la partition de l'énergie radiative et notamment les valeurs de la fraction utile η défini par la relation (1), et qui est donnée ici par le rapport R_{VI}/R_T.

IV.1. — *Comparaison entre* R_T *et le rayonnement global* R_G *mesuré avec un pyranomètre classique*

Simultanément avec les mesures de R_{UV}, R_{VI} et R_{IR}, des mesures de rayonnement global R_G ont été effectuées au moyen d'un pyranomètre classique type Kipp et Zonen dont les coupelles en verre laissent passer le rayonnement compris entre 0,28 μm et 2,8 μm. La figure 4 présente la comparaison entre les valeurs moyennes journalières de R_T et R_G. On peut noter une concordance satisfaisante des deux quantités mesurées avec un très bon coefficient de corrélation ($r = 0{,}996$).

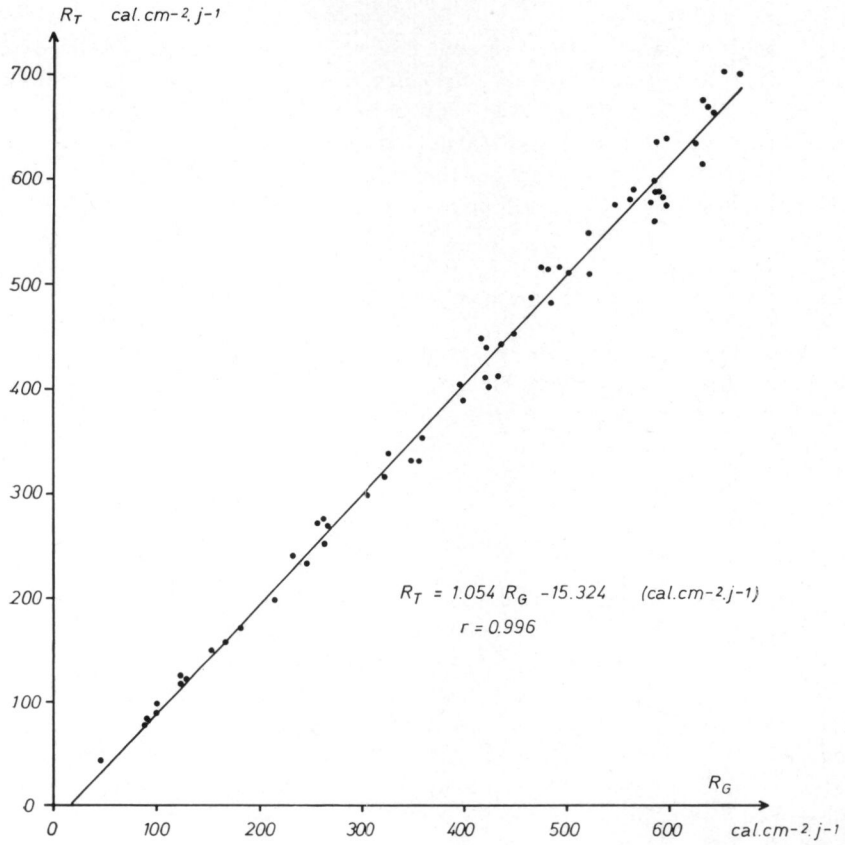


FIG. 4. — *Comparaison entre les valeurs moyennes journalières de* R_G *(solarimètre KIPP) et de* R_T *(pyranomètre sélectif).*

IV.2. — *Rapports des énergies radiatives reçues dans chaque bande et l'énergie radiative totale*

IV.21. *Evolution journalière.*

La figure 5 présente l'évolution journalière des valeurs moyennes horaires des rapports R_{UV}/R_T, R_{VI}/R_T et R_{IR}/R_T pour 2 journées typiques (journée claire et journée couverte). On peut observer que les parts relatives du rayonnement ultra-violet et infrarouge sont moins importantes par temps couvert que par beau temps. Inversement, la part relative du rayonnement visible est plus importante par temps couvert que par beau temps : le rapport η est voisin de 0,42-0,43 pour la journée ensoleillée avec une relativement bonne stabilité alors qu'il varie entre 0,46 et 0,48 pour la journée couverte.

IV.22. *Evolution des moyennes journalières.*

Les moyennes journalières de ces différents rapports ont été calculées et leur évolution au cours des 2 mois de mesures est représentée sur la figure 6. On peut constater

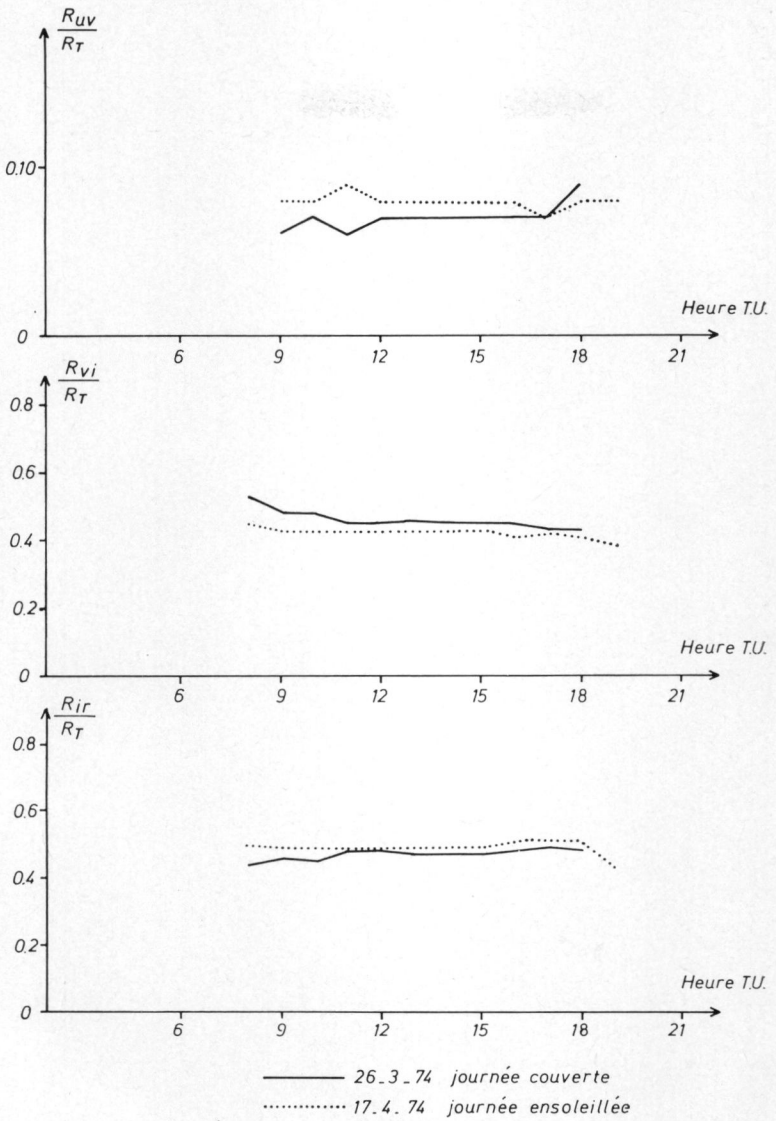


FIG. 5. — *Exemples d'évolution journalière des moyennes horaires des rapports* $\frac{R_{UV}}{R_T}$; $\frac{R_{VI}}{R_T}$; $\frac{R_{IR}}{R_T}$.

les comportements opposés de R_{VI}/R_T et de R_{IR}/R_T, qui présentent cependant une grande stabilité dans le temps malgré les pointes observées les 26 mars, 28 avril et 3 mai.

Par contre, le rapport R_{UV}/R_T semble avoir tendance à croître légèrement au fur et à mesure que la saison avance.

Sur la période de 2 mois considérée, on a obtenu pour les différents rapports les résultats présentés dans le tableau 1.

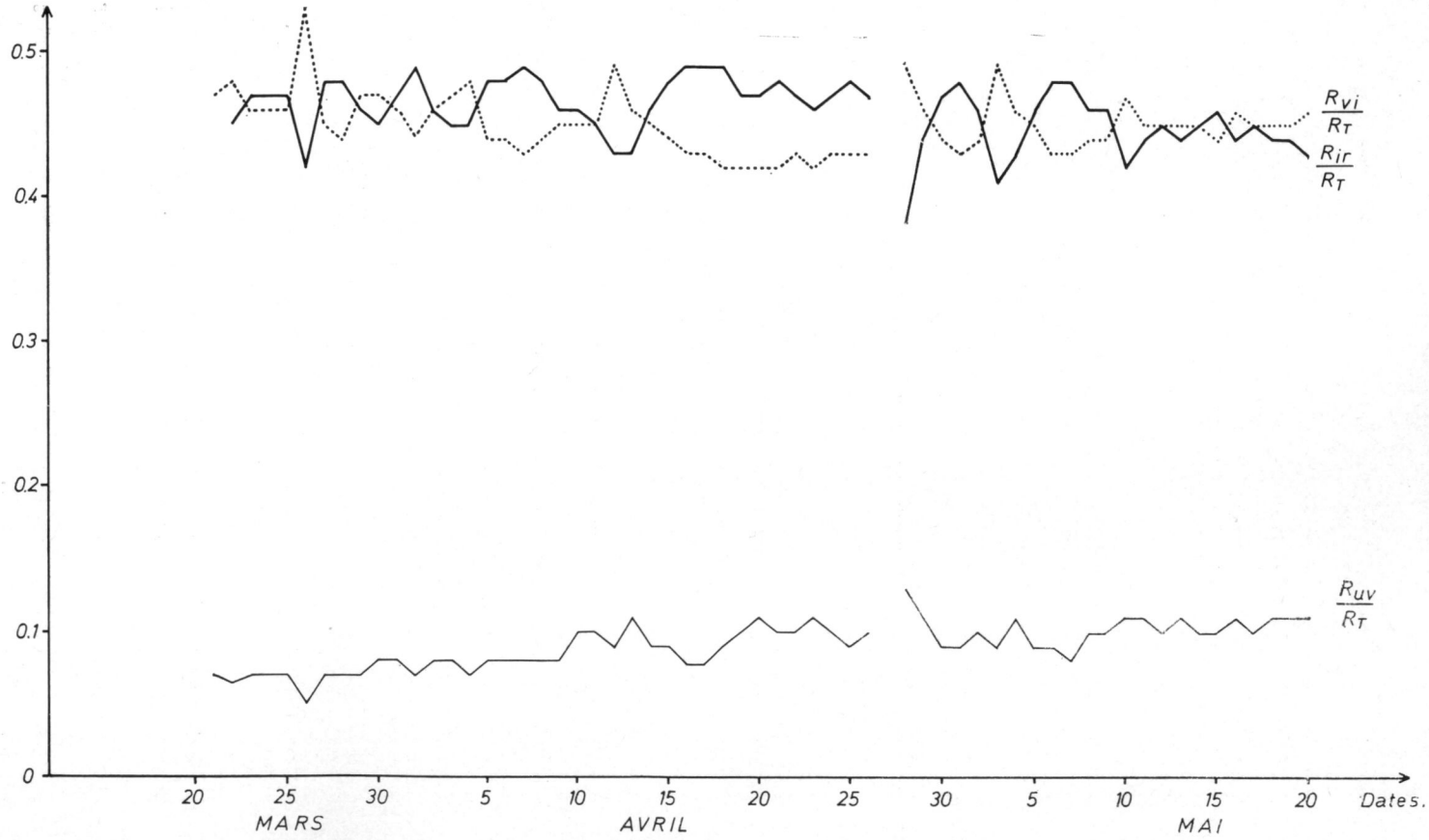


FIG. 6. — *Evolution des moyennes journalières des rapports* $\frac{R_{UV}}{R_T}$; $\frac{R_{VI}}{R_T}$; $\frac{R_{IR}}{R_T}$; $\frac{R_{UV} + R_{VI}}{R_T}$.

TABLEAU 1

Moyenne, maximum, minimum et variance des différents rapports pendant la période 20 mars-20 mai 1974

Rapports	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance
R_{UV}/R_T	0,05	0,13	0,09	0,13
R_{VI}/R_T	0,42	0,49	0,45	0,05
R_{IR}/R_T	0,38	0,49	0,46	0,05
R_{UV}/R_{IR}	0,10	0,29	0,205	0,185
R_{UV}/R_{IR}	0,12	0,26	0,200	0,205
R_{VI}/R_{IR}	0,87	1,29	0,985	0,09

TABLEAU 2

Comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs calculées des différents rapports

Rapports	Valeur mesurée (17 avril)	Valeur calculée ave D/G = 0,20
R_{UV}/R_T	0,08	0,08 à 0,09
R_{VI}/R_T	0,43	0,42 à 0,43
R_{IR}/R_T	0,49	0,49 à 0,50

Pour une journée claire et ensoleillée, les valeurs moyennes journalières mesurées sont très proches des valeurs calculées au moyen des relations 3 à 6 (tabl. 2).

Pour des journées totalement couvertes, les moyennes journalières des différents rapports oscillent entre les valeurs suivantes :

$$0{,}09 < R_{UV}/R_T < 0{,}13$$
$$0{,}47 < R_{VI}/R_T < 0{,}49$$
$$0{,}42 < R_{IR}/R_T < 0{,}45\,.$$

A titre indicatif, on a obtenu les régressions linéaires suivantes entre les différents rayonnements (en cal.cm^{-2} jour^{-1}) et le rapport R_T/G_O (rayonnement global mesuré sur rayonnement global extraterrestre) :

$$R_{UV} = 70{,}4\,\frac{R_T}{G_O} - 7{,}5 \qquad (7)$$

avec un coefficient de corrélation r égal à 0,84

$$R_{VI} = 301{,}7\,\frac{R_T}{G_O} - 16 \qquad (8)$$

$r = 0{,}93$

$$R_{IR} = 339{,}5\,\frac{R_T}{G_O} - 34 \qquad (9)$$

$r = 0{,}96.$

IV.3. — *Les indices d'éclairement*

IV.31. *Evolution journalière des moyennes horaires.*

Les figures 7 et 8 présentent des exemples d'évolution des valeurs moyennes des indices d'éclairement I_{UV}, I_{VI}, I_{IR} et I_T définis dans le paragraphe II.2 pour des journées typiques :

— une belle journée ensoleillée (17.4.74) ;
— une journée très couverte (27.4.74) ;
— une journée avec alternance d'éclaircies et de passage nuageux (9.4.74).

Sur ces exemples, on peut constater que les indices d'éclairement suivent une évolution analogue. Pour l'ultra-violet, on note des variations plus grandes de l'indice, notamment au lever et au coucher du soleil. Ces variations sont sans doute dues aux erreurs expérimentales commises sur les valeurs mesurées R_{UV}, erreurs qui sont encore accrues au lever et au coucher du soleil.

Par belle journée, on constate que les indices horaires peuvent dépasser la valeur 1, ce qui tendrait à prouver — sous réserve que les mesures sont correctes — que pour certaines périodes, l'atmosphère serait plus limpide que l'atmosphère standard considérée.

A titre indicatif, nous avons également porté, sur les figures 7 et 8, l'évolution de l'humidité relative pendant ces journées.

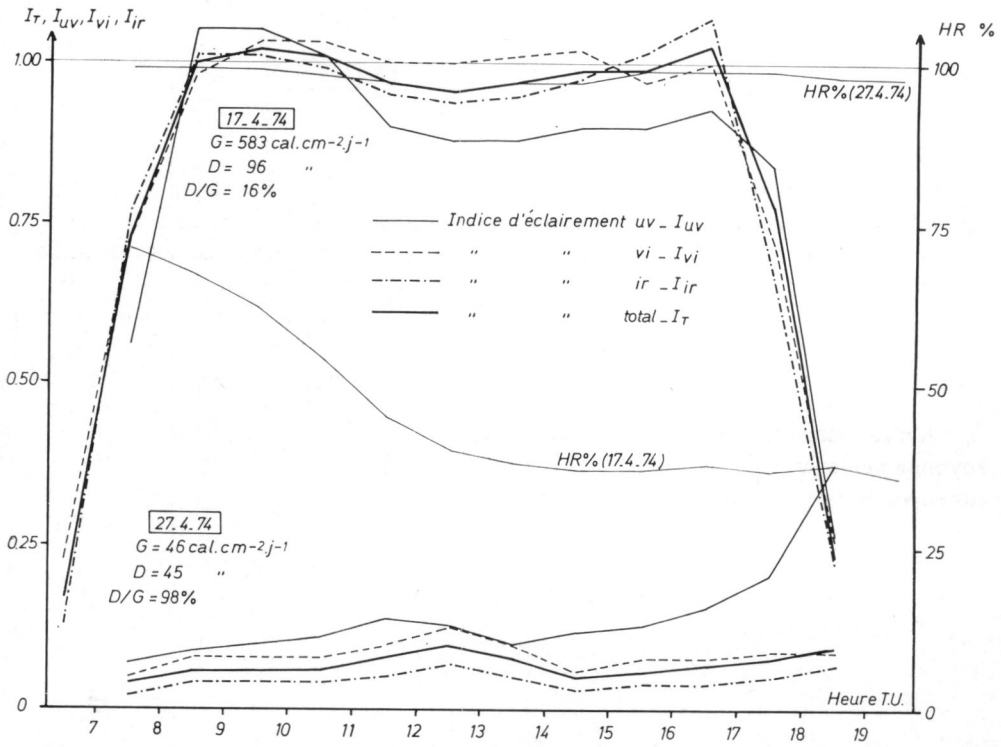


FIG. 7. — *Evolution journalière des moyennes horaires des indices d'éclairement et de l'humidité relative* HR *pour une belle journée* (17 avril 1974) *et pour une journée couverte* (27 avril 1974).

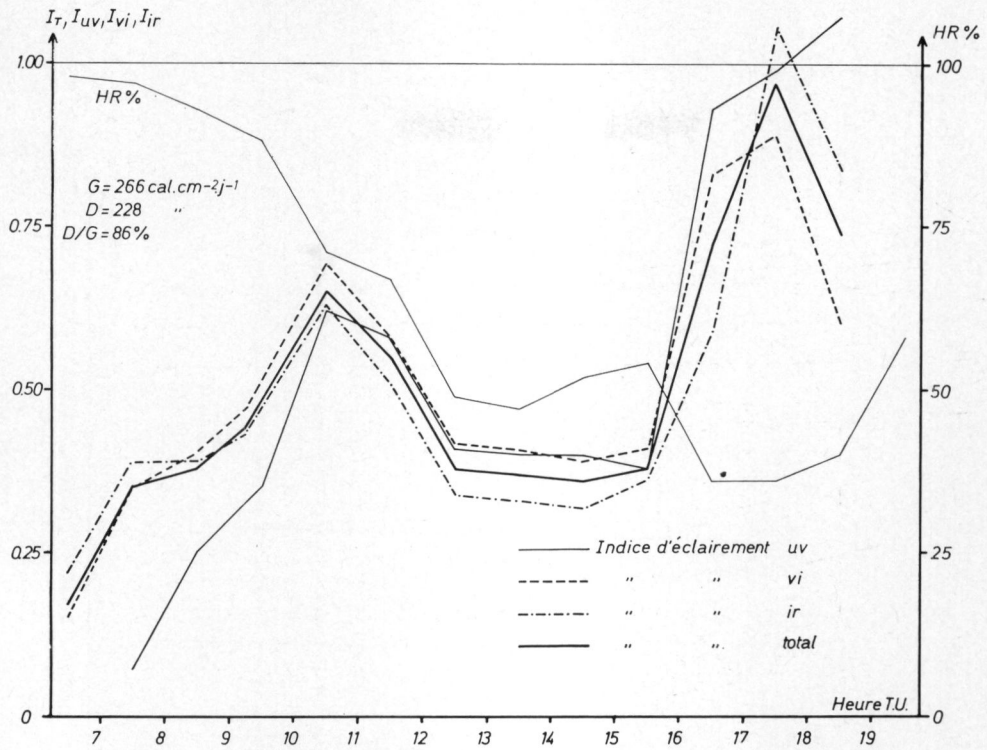


FIG. 8. — *Evolution journalière des moyennes horaires des indices d'éclairement et de l'humidité relative HR pour une belle journée avec passage nuageux* (9 avril 1974).

IV.32. *Evolution des valeurs journalières.*

L'évolution des moyennes journalières des indices d'éclairement partiels I_{UV}, I_{VI} et I_{IR} pour la période du 20 mars au 20 mai 1974 est présentée sur la figure 9. L'évolution de l'indice d'éclairement total est présentée sur la figure 10, avec les valeurs correspondantes de la fraction d'insolation, Fs. Dans l'ensemble, les indices suivent une évolution similaire, avec, pour I_{UV}, une nette tendance à l'augmentation au cours des 2 mois. Par belles journées, cet indice dépasse souvent la valeur unité, alors que I_{VI} n'a dépassé la valeur unité que pour 3 journées pendant la période considérée, et que I_{IR} ne l'a jamais dépassée. C'est cette dernière gamme qui, d'après les résultats, est la plus atténuée.

TABLEAU 3

Moyenne, minimum et maximum des différents indices pendant la période 20 mars-20 mai 1974

Indice	Minimum	Maximum	Moyenne
I_{UV}	0,10	1,22	0,761
I_{VI}	0,18	1,07	0,716
I_{IR}	0,12	0,96	0,642
I_T	0,15	1,01	0,683

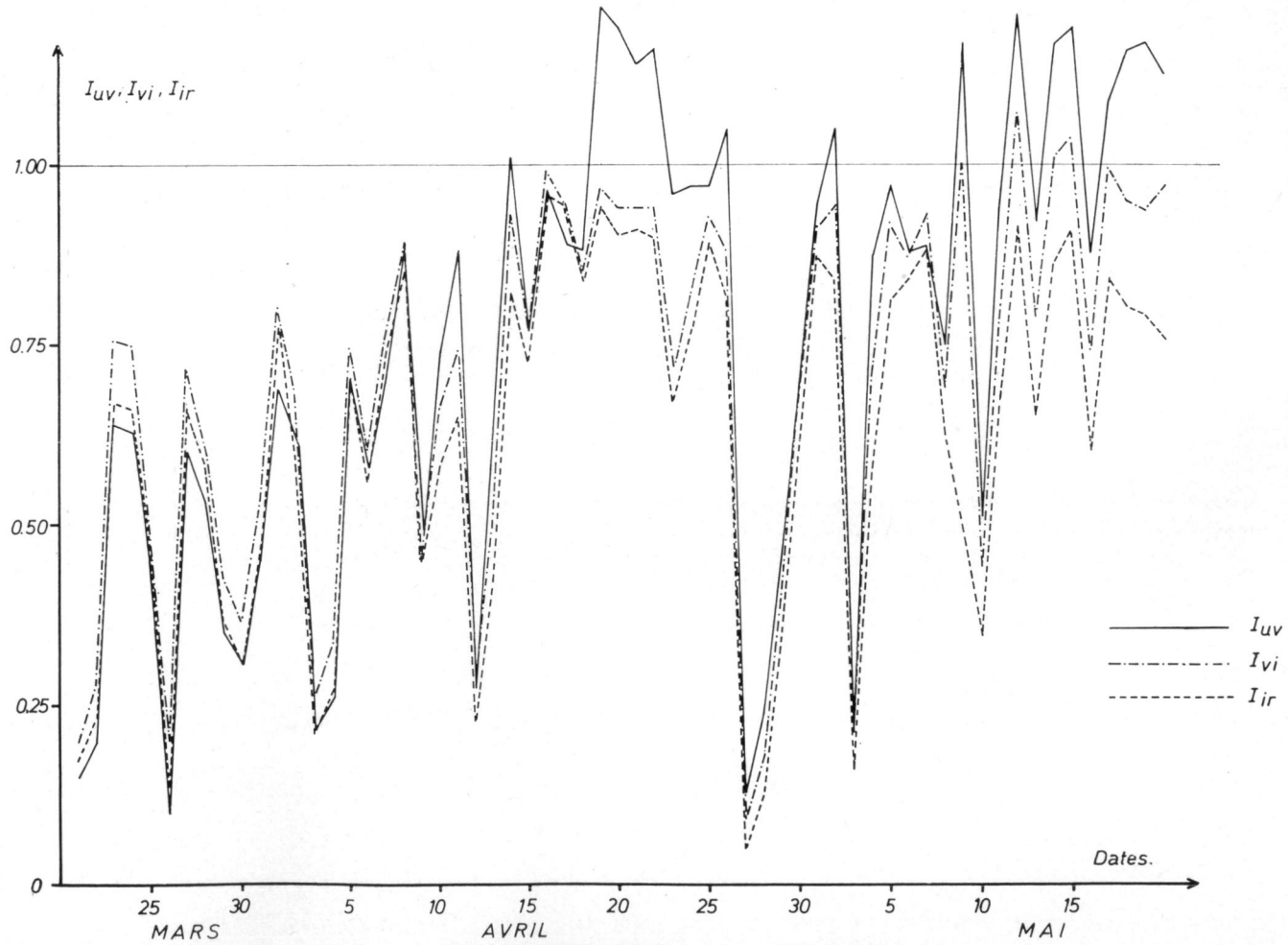


FIG. 9. — *Evolution des divers indices d'éclairement durant la période des mesures.*

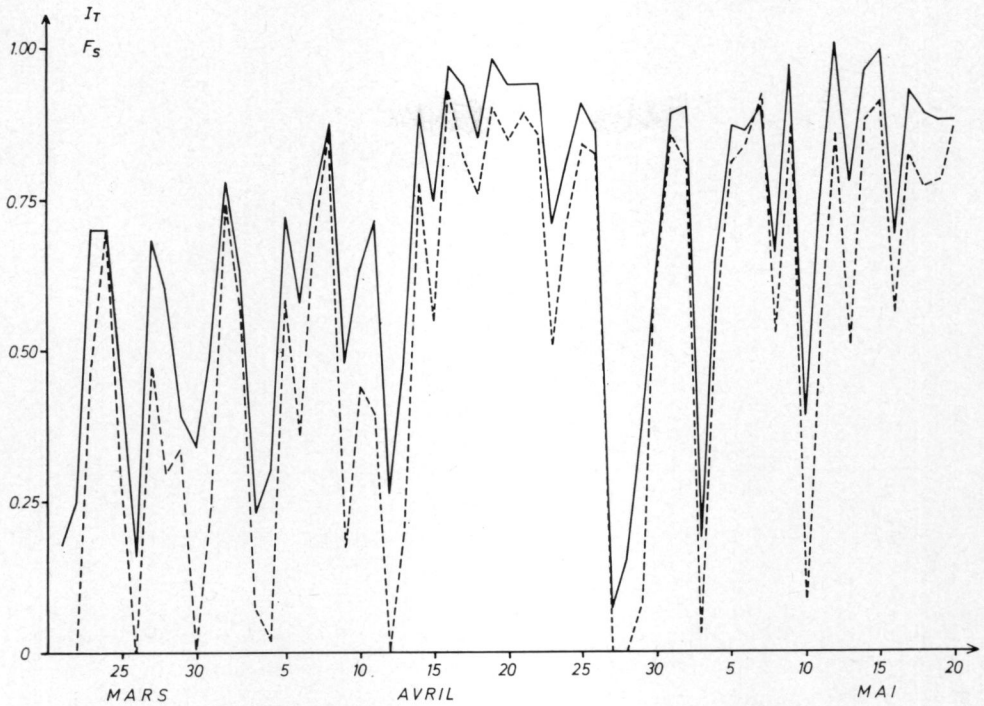


FIG. 10. — *Comparaison entre indice d'éclairement total* I_T *et fraction d'insolation Fs durant la période de mesures* (I_T —— ; *Fs* - - - - -).

L'indice d'éclairement total I_T, qui n'a dépassé la valeur unité qu'en une seule occasion (journée du 12 mai), suit une évolution analogue à celle de la fraction d'insolation Fs. Le tableau 3 présente les valeurs moyennes, minimales et maximales des indices d'éclairement pour la période considérée.

Sur la totalité de la période, c'est dans l'infrarouge que l'on obtient la moyenne la plus faible, ce qui est sans doute logique si on considère que la vapeur d'eau a ses bandes d'absorption les plus importantes dans l'infrarouge. Par contre, le rayonnement ultra-violet dans la gamme 0,3 μm-0,4 μm semble être le moins affecté et présente les indices les plus élevés. Il faut cependant être très prudent dans l'interprétation des valeurs obtenues car les erreurs expérimentales peuvent être importantes dans cette gamme, notamment du fait des calories parasites qui ne sont pas totalement éliminées. L'obtention de valeurs d'indices I_{UV} atteignant 1,15 ou 1,20 par très belles journées peut sans doute être attribuée à une surestimation du rayonnement R_{UV}. Ceci expliquerait également la tendance à l'augmentation, au fur et à mesure que l'on avance dans la saison, des différents rapports R_{UV}/R_T, $R_{UV}/_{VI}$ et $R_{UV}/_{IR}$ constatée précédemment.

IV.33. *Corrélations entre indices d'éclairement et paramètres climatiques.*

IV.331. *Corrélation entre* I_T, I_{IR} *et l'humidité relative moyenne.*

Les exemples de variation des indices d'éclairement au cours des journées-type présentées (fig. 7 et 8) mettent en évidence un certain lien entre ces indices et l'humidité

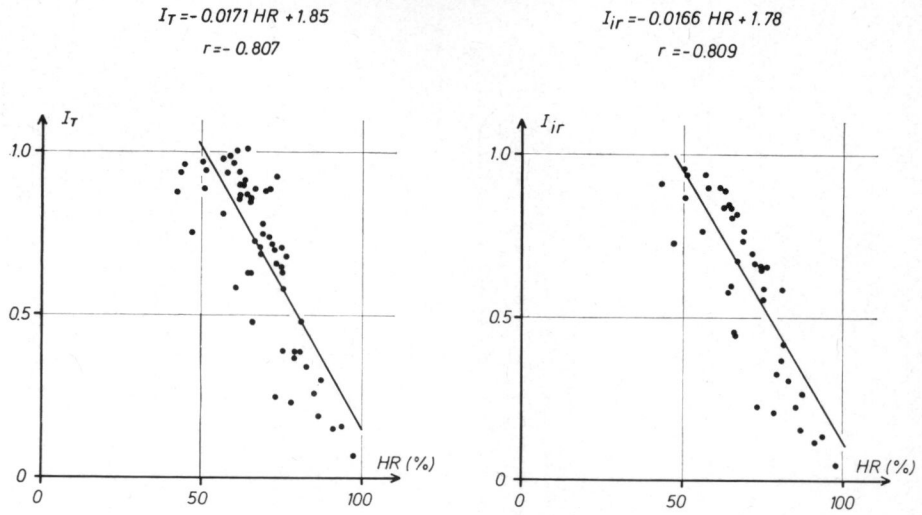


FIG. 11. — *Corrélations entre* I_T, I_{IR} *(moyennes journalières) et l'humidité relative moyenne HR.* Montfavet : du 20-3-74 au 21-5-74.

relative de l'air à 2 m, HR. La figure 11 présente la variation des indices d'éclairement I_{IR} et I_T (moyennes journalières) en fonction de l'humidité relative à 2 m. On observe effectivement une décroissance des indices d'éclairement lorsque l'humidité relative augmente. Les droites de régression obtenues entre ces deux indices et HR sont :

$$I_T = 1{,}85 - 0{,}017\,1\ HR \qquad (HR \text{ en p. } 100) \tag{10}$$

avec $r = -0{,}807$ et :

$$I_{IR} = 1{,}78 - 0{,}016\,6\ HR \tag{11}$$

avec $r = -0{,}809$.

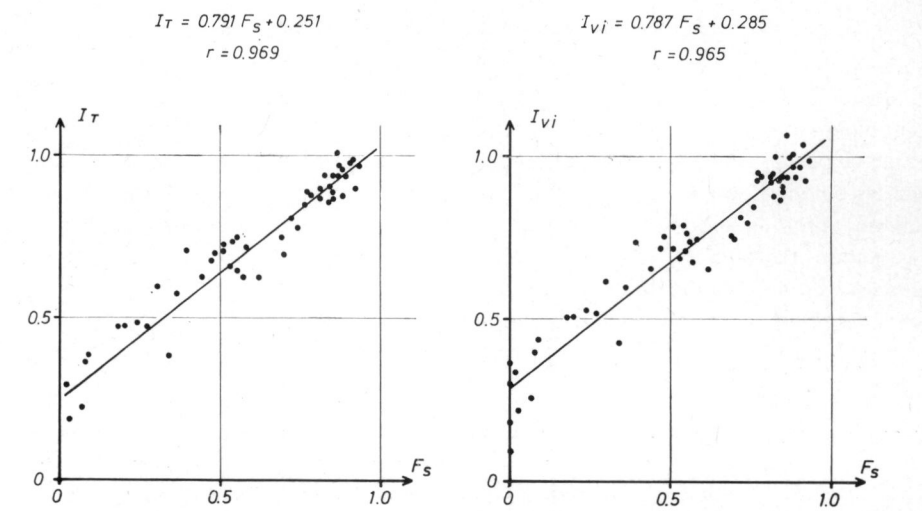


FIG. 12. — *Corrélations entre* I_T, I_{VI} *(moyennes journalières) et la fraction d'insolation* Fs. Montfavet : du 20-3-74 au 21-5-74.

IV.332. *Corrélation entre* I_T, I_{VI} *et la fraction d'insolation.*

La figure 12 présente la corrélation existant entre les indices d'éclairement I_T, I_{VI} et la fraction d'insolation Fs, corrélation qui a été déjà clairement mise en évidence sur la figure 10.

Les droites de régression obtenues donnent :

$$I_T = 0{,}251 + 0{,}791\ Fs \tag{12}$$

avec un coefficient de corrélation r égal à 0,969 et

$$I_{VI} = 0{,}285 + 0{,}787\ Fs \tag{13}$$

avec $r = 0{,}965$.

V. — Discussions

Les résultats obtenus avec le pyranomètre sélectif au cours de la campagne de mesures effectuée du 20 mars au 20 mai 1974 montrent une bonne homogénéité d'ensemble. L'appareil semble fiable, ainsi que le montre la comparaison entre R_T et le rayonnement global mesuré avec une pile solarimétrique classique. De même, les ordres de grandeur des rapports R_{UV}/R_T, R_{VI}/R_T et R_{IR}/R_T sont très proches de celles que l'on peut estimer par le calcul. Il semble cependant que les mesures de R_{UV} soient entachées d'une certaine surestimation due sans doute à la non-élimination totale de calories parasites. Ceci est surtout sensible par belles journées ensoleillées. Il faut signaler que des améliorations ont été apportées sur les modèles plus récents.

En ce qui concerne la partition de l'énergie radiative d'origine solaire entre les différentes gammes, la part relative du visible augmente avec la couverture nuageuse alors que celle de l'infrarouge diminue. Ceci semble logique puisque l'infrarouge est la gamme la plus atténuée par la vapeur d'eau et les nuages. Par belles journées, la fraction utile à la photosynthèse, η, est de l'ordre de 0,43. Par journées couvertes, η est de l'ordre de 0,46, pouvant même atteindre 0,50. La figure 13 présente la variation du rapport η en fonction de la fraction d'insolation : on peut constater la tendance à l'augmentation de η lorsque Fs diminue.

Quant aux indices d'éclairement, les corrélations obtenues avec la fraction d'insolation Fs et l'humidité relative au sol, HR, montrent la nette dépendance de ces indices par rapport à la couverture nuageuse et au contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. A notre avis, il sera difficile, à partir de ces indices, de discriminer la part due à la pollution atmosphérique ou aux particules, sauf pour des périodes de beau temps, ainsi que l'ont fait Unsworth et Monteith.

Par contre, sur des périodes longues (saison ou année), des méthodes d'analyse statistique performantes pourraient sans doute permettre de dégager l'influence du niveau global de pollution et sa tendance. Ce serait donc plus un appareil de surveillance à long terme qu'un appareil permettant d'apprécier le niveau journalier ou hebdomadaire de la pollution. Pour ce dernier objectif, le coefficient de trouble atmosphérique, avec tous les inconvénients qu'il peut présenter, semble mieux indiqué.

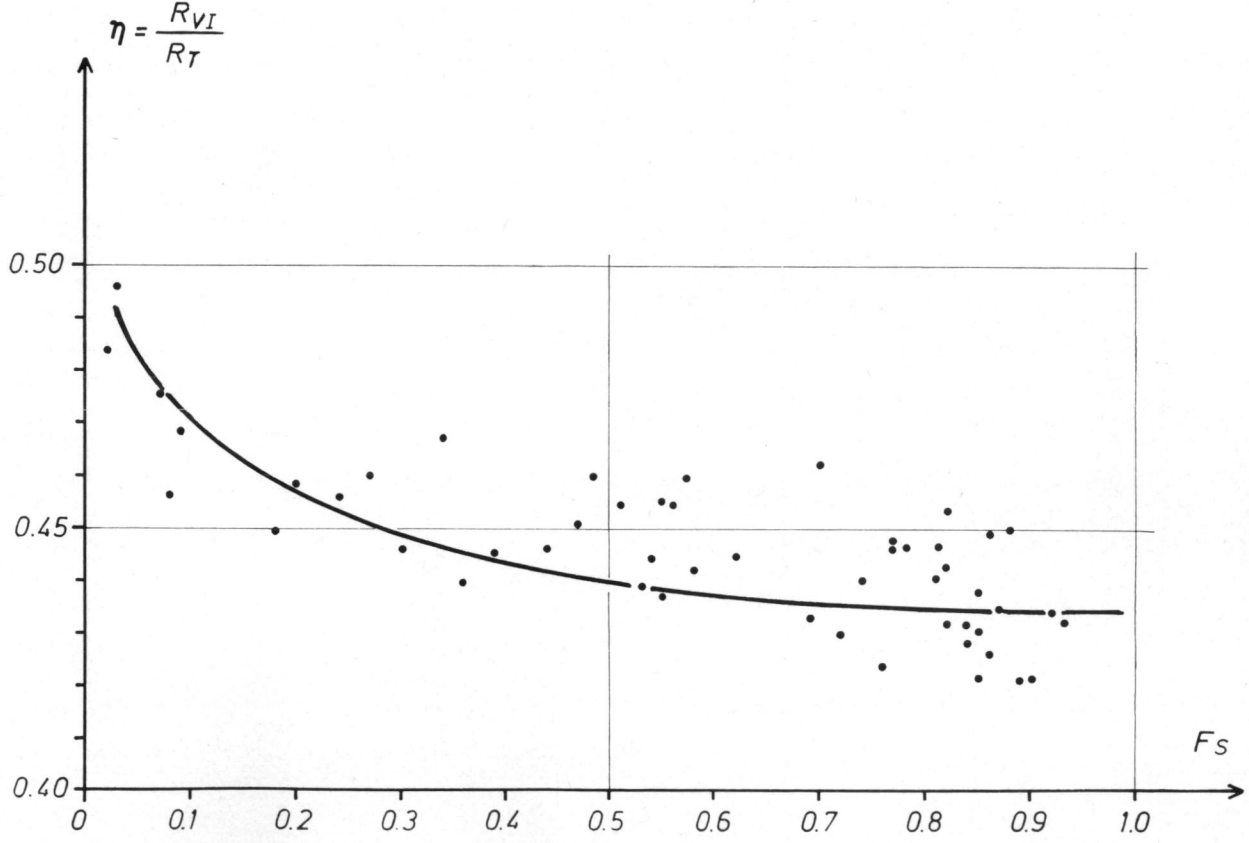


FIG. 13. — *Variation du rapport η en fonction de la fraction d'insolation.*
Montfavet : du 20-3-74 au 21-5-74.

Au point de vue agronomique, cet appareil permet de mesurer l'énergie radiative disponible pour la photosynthèse dans la gamme 0,4 μm-0,72 μm. Il présente donc un intérêt certain pour les études concernant les relations rayonnement-photosynthèse au niveau d'un couvert végétal.

Reçu pour publication en mars 1978.

Summary

Study of possibility to use a selective pyranometer in agronomy and atmospheric pollution

This paper presents some results of radiation measurements in the UV, visible and IR bands obtained with a selective pyranometer. This instrument, created initially for the measurement of the « irradiance index », was tested during a two-months period in the natural conditions. Comparisons of results given by this instrument, either with other radiation measurements, either with calculated values, show its fiability and its good accuracy in the visible and IR bands. In particular, it is possible to use it for photosynthetically active radiation (P.A.R.) measurements. On the other hand, experimental errors seem to be more important in the UV band and are possibly due to the fact that filter heating by non UV radiation cannot be entirely eliminated.

Irradiance index calculated from these measurements show a strong dependance to cloudiness and water vapor content of the atmosphere. So, excepted for sunny days, it seems difficult to use such index as indications of global pollution-level or of aerosol content. However, for long periods, these indexes could be useful in giving informations about the general pollution trend and about the long term variations of aerosol load.

Zusammenfassung

Das selektive Pyranometer : Untersuchung seiner Verwendungsmöglichkeiten im landwirtschaftlichen Bereich und im Bereich der atmosphärischen Verunreinigung

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse von Strahlungsmessungen in den drei UV, sichtbaren und infraroten Wellenbereichen vor, die mit einem selektiven Pyranometer erzielt worden sind, der ursprünglich für die worden war. Messung des « Beleuchtungsindexes » entworfen. Während einer zweimonatigen Zeitspanne wurde dieser Apparat an Ort und Stelle unter den Betriebsbedingungen geprüft. Der Vergleich der mit diesem Apparat erzielten Ergebnisse mit anderen Strahlungsmessungen oder auch mit errechneten Werten beweist seine Zuverlässigkeit und befriedigende Genauigkeit in den sichtbaren und infraroten Bereichen. Es ist insbesondere möglich, diesen Apparat zur Bestimmung der für die Photosynthese nützlichen Fraktion zu verwenden. Im UV Bereich dagegen scheinen die experimentellen Fehler höher zu sein ; sie beruhen wahrscheinlich auf den parasitischen Kalorien, die nicht ganz beseitigt werden konnten.

Die auf grund dieser Ergebnisse errechneten Beleuchtungswerte zeigen eine starke Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad und dem Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre. Bei Ausser schönem Wetter scheint es schwierig, diese Werte zu benutzen um den gesamten Verunreinigungsgrad einer Gegend zu keunzeichnen. Laugfristig gesehen könnten diese werte hingegen eine Bestimmung der weitläufigen Entwicklung und der Schwankungen des Verunreinigungsgrads ermöglichen.

РЕЗЮМЕ

Селективный пиранометр : изучение возможностей его применения в области агрономии и при атмосферическом загрязнении.

А. БАЙ, Р. ГИШЕР, МАРИЯ МЕРМЬЕ.

В данном труде представлены результаты измерений излучений в трех гаммах, Ультрафиолетовой, видимой и инфра-красной, селективного пиранометра, применявшегося сначала для измерения показателя освещенности. Аппарат этот тестировался в течении двух месяцев в условиях хозяйства, в поле. Сравнение результатов полученных с его помощью, с результатами разных других способов измерения, или результатами вычислений, показывает

большую надежность этого аппарата и достаточную точность его видимой и инфра-красной гамм. Он может, в частности, применяться при определении полезной для фотосинтеза фракции. В ультра-фиолетовой гамме — больше экспериментальных ошибок и находятся они в зависимости от неполностью удаленных паразитических калорий.

Показатели освещенности, вычисленные на базе этих измерений, сильно зависят от условий облачности и от влажности атмосферы. Но, вне периодов ясной погоды, применение этих показателей для охарактеризования уровня общего загрязнения данной местности, может оказаться трудным. И, напротив, возможно что смогут они позволить определение тенденций и долгосрочный прогноз изменений уровня загрязнения.

Références bibliographiques

AVASTE O., MOLDAU H., SHIFRIN K. S., 1962. Spectral distribution of direct and diffuse radiation. *Akad. Nauk. Est. SSR. Inst. Phys. Astron.* nº 3.

BACH W., 1973. Solar irradiation and atmospheric pollution. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B **21**, 67-76.

BAILLE A., MERMIER M., REICH P., 1976. *Mise au point d'un programme de dépouillement et d'exploitation de mesures de rayonnement (bilan radiatif, facteur de trouble, indice d'éclairement).* Note Interne M/76/5. INRA. Station de Bioclimatologie d'Avignon.

BAILLE A., Marie MERMIER, 1977. Etude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet). I. Evolution du trouble pendant le premier semestre 1976. *Ann. agron.* **28** (5), 543-560.

GUICHERD R., 1974. *Etude, réalisation et exploitations d'un pyranomètre sélectif destiné à la définition et à la mesure de l'indice d'éclairement.* Thèse d'Université. Faculté des Sciences et Techniques de St-Jérôme. Marseille.

IDSO S. B., 1971. The utility of diffuse skylight measurements in characterizing low-levels of particulate air pollution. *Atm. Env.*, **5** (8), 599-606.

MC CREE K. J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agr. Met.* **10**, 443-453.

MC CREE K. J., KEENER M. E., 1974. Effect of atmospheric turbidity on the photosynthetic rate of leaves. *Agr. Met.* **13**, 349-357.

MC CREE K. J., 1976. A comparison of experimental and theoretical spectra for photosynthetically active radiation at various atmospheric turbidities. *Agr. Met.* **16**, 405-412.

SZCEICZ B., 1974. Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.* **11** (2), 617-636.

UNSWORTH M. H., MONTEITH J. L., 1972. Aerosol and solar radiation in Britain. *Quart. J. Roy. Meteo. Soc.* **98**, 778-795.

VARLET GRANCHET C., 1975. Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variable. *Ann. agron.* **26** (3), 245-254.

WILLIAMS J. G., 1976. Small variations in the photosynthetically active fraction of solar radiation on clear days. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. 8, **24**, 209-217.

YAMASHITA S., 1973. Air pollution study from measurements of solar radiation. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. 8, **21**, 243-251.

Ann. agron., 1978, **29** (1), 79-88.

Mesure de l'évapotranspiration. Méthode et critiques

G. LACAZEDIEU et Ph. MALAURENT

Centre d'Hydrogéologie, Université de Bordeaux I, 33405 *Talence Cedex*

Résumé

Une expérimentation sur nappe libre maintenue à niveau constant à 0,25, 0,50, 0,75 m sous la surface du sol, à partir de bacs remplis d'un matériau argilo-sableux a permis de quantifier les pertes par évapotranspiration et de les comparer à celles déduites des formules classiques (Thornthwaite, Turc, Penman).

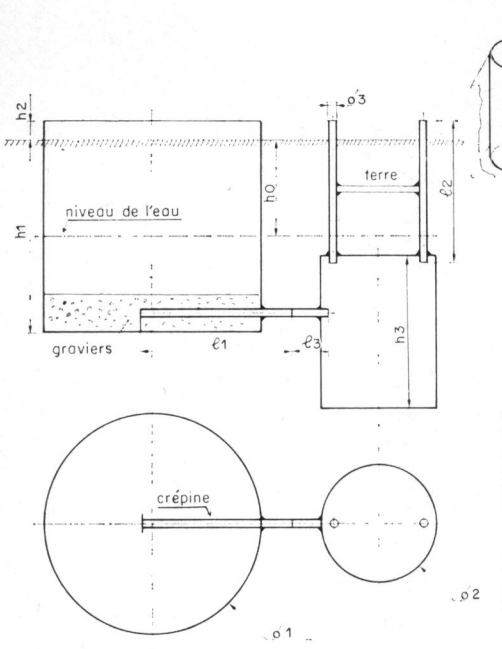
I. — Introduction

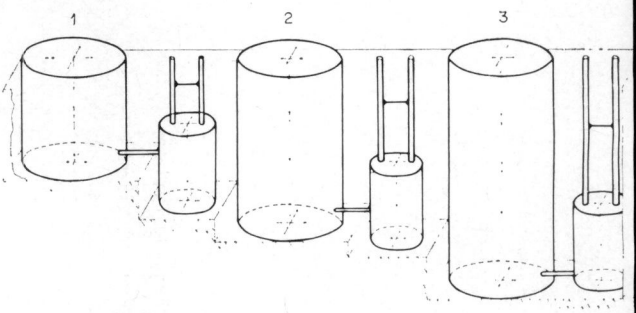
En marge de l'étude effectuée dans le cadre de l'Action Thématique Programmée Hydrogéologie, du C.N.R.S. « Interaction entre l'eau souterraine, milieu et agent vecteur et son environnement naturel, » menée sur le terrain expérimental de Talence Gironde (Centre d'Hydrogéologie, Université de Bordeaux I), nous avons conçu, et installé un dispositif de mesure pour évaluer les pertes d'eau par évapotranspiration de nappes maintenues à niveau constant à 0,25, 0,50, 0,75 m sous la surface du sol. Compte tenu de la présence d'un aquifère temporaire dans la tranche superficielle du terrain, cette expérimentation avait pour but, d'une part d'apporter des valeurs plus conformes que celles fournies par les méthodes classiques et de déterminer ainsi un terme du bilan obtenu généralement par le calcul, d'autre part de localiser en profondeur la limite des effets de l'évapotranspiration.

Après une description critique du dispositif de mesure, nous exposerons les résultats. Leur comparaison aux valeurs obtenues par les formules classiques va soulever un certain nombre de questions, que l'insuffisance d'observations ne nous autorise pas, pour l'instant, à élucider. En conséquence nous émettrons en conclusion des présomptions que l'interprétation des données d'une étude plus sélective devrait permettre ultérieurement, de confirmer ou d'infirmer.

II. — Dispositif de mesure et mode de calcul

Le dispositif expérimental dont le dessin et les caractéristiques sont donnés figure 1, se compose de bidons métalliques enterrés plus ou moins profondément dans le sol, comportant à leur base une couche de graviers, surmontée du matériau originel replacé aussi fidèlement que possible. Ce matériau est constitué dans les bacs 1 et 2 par des limons sablo-argileux qui, dans le bac 3, reposent sur un banc d'argile sableuse de 10 cm d'épaisseur.





	h0	h1	h2	h3	ℓ1	ℓ2	ℓ3	ø1	ø2	ø3
1	250	490	50	400	400	350	80	585	310	21
2	500	800	50	400	400	600	80	585	310	21
3	750	1110	50	400	400	850	80	585	310	21

FIG. 1. — *Bacs d'évapotranspiration* (évaporation de 3 mm/j : 0,8 dm³ de consommation d'eau par bac).

L'alimentation est assurée en permanence par un système de réservoirs aériens (vases de Mariotte), sur lesquels des relevés, par lecture directe, sont faits à la demande et qui maintient à niveau sensiblement constant l'eau renfermée dans des réservoirs enfouis, connectés aux bacs d'évapotranspiration.

Cet équipement bien que rudimentaire, mais peu coûteux, a fourni des données dont l'interprétation a exigé quelques précautions et hypothèses afin d'éliminer l'influence des paramètres que le fonctionnement défectueux d'enregistreurs n'a pas permis de contrôler. En effet, il ne nous a pas été possible de mesurer les modifications de températures provoquées par notre système d'alimentation ; compte tenu du volant d'eau disponible dans le sol et de son temps de séjour, nous avons estimé que ces modifications étaient négligeables. Par ailleurs, les variations de la pression atmosphérique et de la température modifient le volume de l'air contenu dans les réservoirs aériens en matière plastique exposés à la radiation solaire. Ceci nous a conduit à ne calculer que des moyennes journalières pour des périodes telles qu'au début et à la fin, les conditions atmosphériques ainsi que les hauteurs d'eau dans les bacs soient semblables.

Pour les différentes périodes, le calcul pour chacun des bacs a été basé sur la formule suivante :

$$ET = P + A \pm \Delta r$$

ET (mm) : évapotranspiration ;
P (mm) : pluie mesurée sur le terrain expérimental ;
A (mm) : alimentation artificielle par les réservoirs ;
Δr (mm) : variations des réserves de la zone saturée.

TABLEAU 1

Caractéristiques climatiques et résultats 1975

Périodes du au	θ °C	Pluie mm	Bac 1 A mm	Bac 1 Et mm	Bac 2 A mm	Bac 2 Et mm	Bac 3 A mm	Bac 3 Et mm	Pennam ETP mm	Turc ETP mm	Thornthwaite ETP mm
1er au 7 avril	5°	30,8	0	12,0	0	12,0	0	12,0	12,0		
7 au 18 —	10° 4	22,4	0	22,0	0	22,0	0	22,0	22,0		
18 au 21 —	12° 3	25,6	0	6 0	0	6 0	0	6,0	6,9		
21 au 26 —	15° 4	0	0	12,5	0	10,0	0	10,0	22,5		
26 avr. au 1er mai	14° 9	0,2	13,1	13,0	0	7,0	0	7,0	23,0		
		79,0	13,1	65,5	0	57,0	0	57,0	86,4	71,5	53,7
1er au 7 mai	11° 2	1,8	10,7	18,0	0	8,4	0	6,6	18,6		
7 au 12 —	12° 6	37,8	0	18,0	0	18,0	0	18,0	9,0		
12 au 19 —	15° 9	10,6	0	21,0	0	15,4	0	15,4	17,5		
19 au 28 —	15° 1	0	30,5	32,4	24,8	26,1	0	9,9	3,5		
28 au 1er juin	13° 9	25,4	0	13,6	0	13,6	0	13,6	6,0		
		75,6	41,2	103,0	24,8	81,5	0	63,5	86,6	94,7	78,0
1er au 4 juin	13°	4,4	2,0	11,4	4,1	10,8	0	8,4	9,3		
4 au 10 —	17° 7	0	26,7	26,4	26,7	26,4	0	11,4	20,4		
10 au 18 —	17° 6	3,8	31,2	35,2	31,7	35,2	0	11,6	21,5		
18 au 27 —	20° 1	1,4	57,1	50,4	37,8	37,8	16,6	16,2	28,8		
27 juin au 1er juill.	19° 7	10,2	27,1	26,4	17,5	17,6	11,2	11,2	18,8		
		19,8	144,1	149,8	117,8	127,8	27,8	58,8	98,8	120,4	108,5
1er au 5 juill.	19° 1	7,0	30,5	30,0	24,0	26,0	12,6	12,8	20,8		
5 au 10 —	20° 5	1,8	45,8	47,5	32,0	34,0	27,4	29,0	19,0		
10 au 18 —	20° 9	13,0	78,6	92,8	51,6	64,8	36,3	46,4	33,6		
18 au 25 —	19° 1	3,2	78,1	81,9	51,1	54,6	37,6	40,6	21,7		
25 au 28 —	21° 9	0	38,3	36,6	24,7	22,8	18,0	18,6	21,9		
28 juill. au 1er août	25° 2	0	60,8	50,0	36,1	36,0	30,0	30,0	27,6		
		25,0	332,1	338,8	219,5	238,2	161,9	177,4	144,6	159,5	132,5
1er au 4 août	27° 6	0	19	18,9	13,6	13,5	11,7	11,7	27,9		
4 au 13 —	21° 4	47,0	1,5	56,7	6,5	40,5	3,8	35,1	45,0		
13 au 17 —	20° 9	3,2	24,3	25,2	16,2	18,0	12,7	15,6	12,0		
17 au 20 —	21° 3	14,6	5,9	18,9	0	13,8	0	12,6	11,4		
20 au 24 —	17°	4,8	17,7	24,0	12,7	18,8	12,6	17,2	10,8		
24 au 27 —	19° 2	8,2	10,6	17,7	7,1	14,7	6,5	12,9	15,0		
27 au 1er sept.	18° 5	0	26,8	29,5	22,9	23,0	20,3	20,5	15,0		
		77,8	119,3	190,9	79,0	142,3	67,6	125,6	137,1	116,2	121,7
1er au 10 sept.	18° 3	2,2	44,7	39,6	36,6	37,8	32,8	34,2	23,4		
10 au 18 —		88,3	0	24,0	0	24,0	0	24,0	15,2		
18 au 20 —		0	0	6,0	0	4,8	0	3,6	3,4		
20 au 25 —	17° 5	0	19,7	15,0	0	7,5	0	6,5	9,5		
25 sept. au 1er oct.		35,0	0	12,0	0	6,0	0	6,0	16,3		
		125,5	64,4	96,6	36,6	80,1	32,8	74,3	67,8	76,4	75,0
1er au 13 oct.	12° 3	2,0	21,3	27,3	0	15,6	0	13,0	18,0		
13 au 21 —		31,0	0	12,0	0	12,0	0	12,0	9,7		
21 au 31 —	13° 9	0,4	4,1	15	0	7	0	7	24,0		
		33,4	25,4	54,3	0	34,6	0	32,0	51,7	52,4	47,6

Notons que nous avons négligé les réserves de la zone non saturée. Ceci peut être abusif lors des périodes pluvieuses importantes (pour lesquelles nous avons relevé des consommations d'eau comparables pour les trois bacs quelle que soit la profondeur de la nappe, traduisant ainsi la prédominance de l'interception et de l'évaporation dans le cas d'un apport par aspersion) et entraîne pour ces mêmes périodes une surestimation des valeurs.

Le couvert végétal était constitué à l'origine par une végétation herbacée basse. Dans le bac 1, l'humidité permanente, due à la faible profondeur de la nappe, a induit le développement de joncs.

TABLEAU 2

Caractéristiques climatiques et résultats 1976

			Bac 1		Bac 2		Bac 3		Penman	Turc	Thornthwaite
Périodes du au	θ °C	Pluie mm	A mm	Et mm	A mm	Et mm	A mm	Et mm	ETP mm	ETP mm	ETP mm
1er au 6 avril	11° 1	8,6	7,9	16,5	4,0	12,5	1,0	8,5	6,0		
6 au 14 —	9° 6	0	26,4	26,4	13,6	13,6	8,7	8,8	24,8		
14 au 26 —	11° 6	29,6	20,2	49,2	0	30,0	0	30	28,8		
26 avr. au 1er mai	11° 3	0	21,1	21,0	11,3	11,5	8,9	9,0	21,5		
		38,2	75,6	113,1	28,9	67,6	18,6	56,3	81,1	73,1	43,8
1er mai au 5 mai	14° 6	0	11,4	16,8	13,6	13,6	7,3	7,2	14,0		
5 au 11 —	17°	24,6	2,3	24,6	5,0	24,6	0	24,6	24,6		
11 au 17 —	14° 1	0	21,4	24,6	18,2	20,4	10,9	10,8	19,2		
17 au 23 —	14° 5	13,6	7,4	25,8	11,4	25,2	4,7	18,0	16,2		
23 mai au 1er juin	16° 6	1,2	38,5	45,9	31,7	34,2	23,5	23,4	29,7		
		39,4	81,0	137,7	79,9	118,0	46,4	84,0	103,7	106,6	91,5
1er au 8 juin	17°4	0	51,1	51,1	42,5	32,2	24,0	23,8	40,6		
8 au 24 —	22°	4,0	121,0	120,0	88,6	88,0	63,7	64,0	89,6		
24 juin au 1er juill.	26 °1	6,6	72,7	72,8	55,4	54,6	33,2	32,9	53,9		
		10,6	244,8	243,9	186,5	174,8	120,9	120,7	184,1	169,2	170,9
1er au 4 juill.	24° 5	0	30,9	31,2	22,8	21,0	5,9	6,0	21,6		
4 au 6 —	21° 8	20,0	0	20,0	0	12,0	0	7,6	4,0		
6 au 15 —	21° 6	6,2	74,6	81,0	42,4	48,6	4,5	18,0	43,2		
15 au 19 —	19° 1	48,4	18,3	30,4	13,3	24,0	6,0	18,4	6,8		
19 au 24 —	19° 8	0	47,5	48,0	10,4	18,0	14,1	13,0	26,5		
24 juill. au 1er août	20° 5	0	82,7	82,4	62,8	62,4	0	8,8	51,2		
		74,6	254,0	293,0	151,7	186	30,5	71,8	153,3	143,3	169,8
1 au 10 août	23° 9	0	92,7	92,7	66,5	67,5	16,8	18,0	50,4		
10 au 18 —	19° 7	27,8	25,0	54,4	14,2	41,6	3,4	27,2	19,2		
18 au 23 —	22° 5	0	51,3	51,5	25,8	26,0	3,0	15,0	39,0		
23 au 25 —	19° 8	12,4	6,3	19,4	1,6	14,4	0	10,6	5,0		
25 au 28 —	20° 3	5,4	16,0	27,3	9,4	14,7	0	7,8	11,1		
28 au 1er sept.	17° 4	68,0	0	28,4	0	21,2	0	10,4	10,4		
		113,6	191,3	273,7	117,5	185,4	23,2	89,0	135,1	122,8	141,4
1er au 11 sept.	15° 9	13,8	17,7	32,0	0	25,0	0	11,0	27,0		
11 au 17 —	13° 2	79	0	12,0	0	9,0	0	6,0	10,8		
17 au 25 —	17° 2	1,4	15,6	25,6	0	12,0	0	8,0	20,8		
25 au 1er oct.	17° 5	19,4	0	9,6	0	6,6	0	3,6	15,6		
		113,6	33,3	79,2	0	52,6	0	28,6	74,2	73,1	68,1

III. — Résultats

L'expérimentation commencée en avril 1975 a été poursuivie jusqu'en octobre 1976, avec interruption d'octobre 1975 à mars 1976 en raison du risque de gel qui nous a contraint à la vidange des réservoirs d'alimentation. Les résultats sont donnés, en ce qui concerne les valeurs moyennes pour les périodes considérées, par les tableaux 1 et 2 et les figures 2 et 3 et en ce qui concerne les valeurs mensuelles par la figure 4.

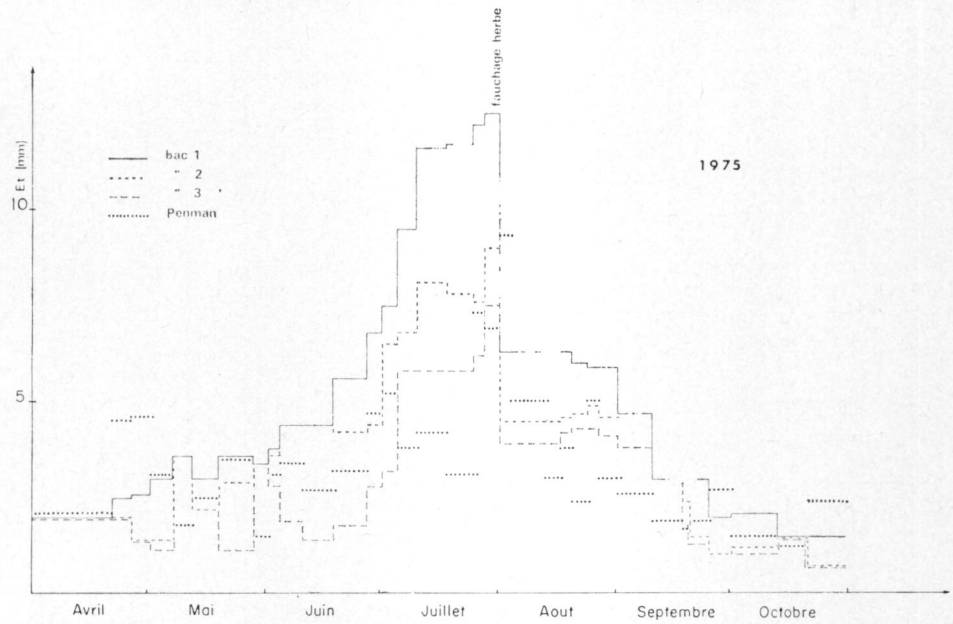


FIG. 2. — *Evapotranspiration moyenne journalière.*

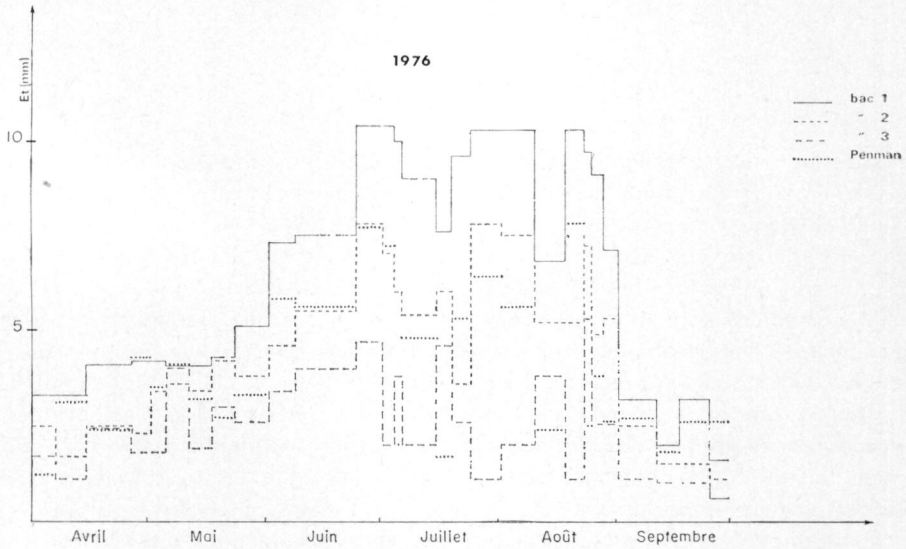


FIG. 3. — *Evapotranspiration moyenne journalière.*

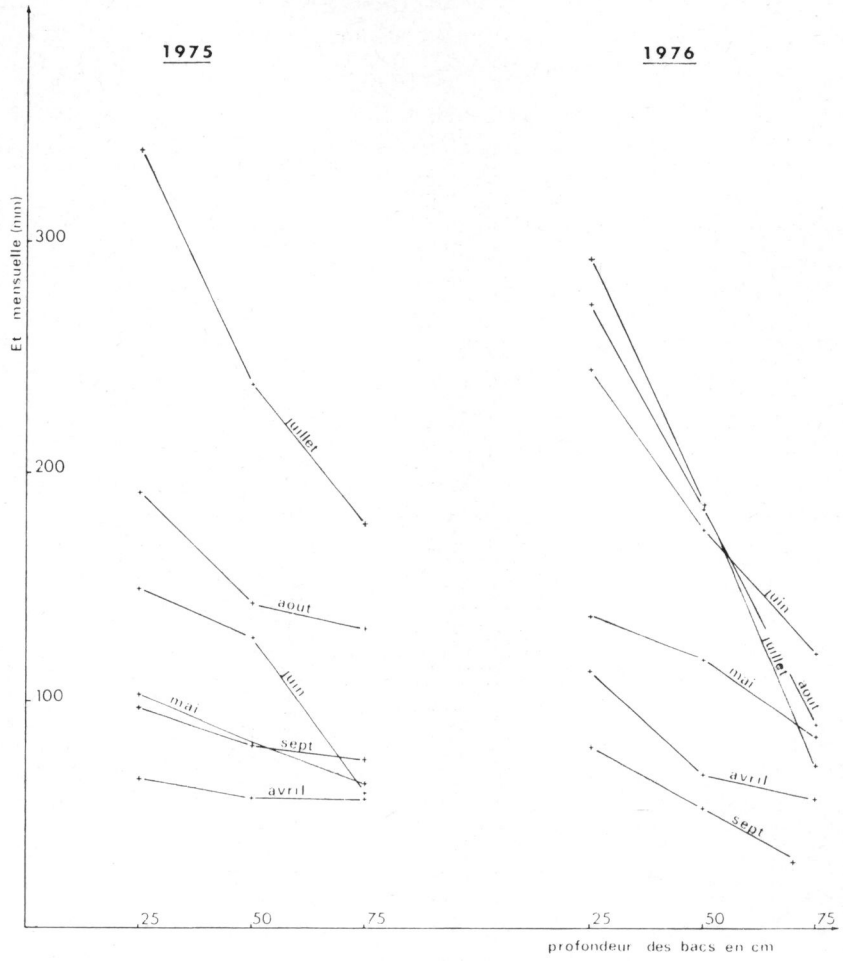


FIG. 4. — *Evolution mensuelle de l'ET en fonction de la profondeur.*

Dans les tableaux récapitulatifs, nous avons en outre inclus les données climatiques afin de mieux définir, d'une année sur l'autre, les variations essentiellement induites par une pluviométrie déficitaire au printemps et à l'été 1976 ; les écarts des moyennes mensuelles de température n'excédant 1 °C que pour mai (13° 7 en mai 1975, 15° 4 pour mai 1976) et juin (17° 6 en juin 1975 pour 21° 8 en juin 1976).

L'examen des résultats montre que, pour certaines périodes, les valeurs mesurées dépendent peu de la profondeur de la surface piézométrique. C'est le cas pour tous les bacs en avril 1975 et octobre 1975, pour les bacs 2 (0,50 m) et 1 (0,25 m) en mai 1975, la première quinzaine de juin 1975, septembre 1975 et avril 1976. Ces périodes, à l'exception de la première quinzaine de juin 1975, correspondent à des valeurs relativement faibles de l'évapotranspiration, et sont concomitantes ou font suite à des épisodes pluvieux importants.

Cette anomalie peut s'expliquer par une variation de stock dans la zone non saturée, induite par une différence de porosité. Pour la première quinzaine de juin

1975, l'explication de l'anomalie réside soit dans un déphasage des températures en fonction de la profondeur, ce que des observations ultérieures devront vérifier, soit, plutôt, dans les besoins en eau de la végétation accrus pendant les périodes de croissance.

L'influence de la profondeur de l'eau apparaît au contraire très nettement dans les périodes estivales, le contraste maximum ayant lieu en juillet 1976 où l'évapotranspiration mensuelle est 4 fois plus importante dans le bac 1 que dans le bac 3.

La comparaison des résultats entre 1975 et 1976 fait apparaître des valeurs relativement élevées pour le bac 3 en juillet et août 1975 ; ceci peut être expliqué par le fonctionnement défectueux des réservoirs qui ont temporairement maintenu le niveau de l'eau à 0,60 m au lieu de 0,75 m.

La diminution brutale des valeurs de l'évapotranspiration à partir du 1er août 1975 ne peut être mise sur le compte d'une variation des conditions atmosphériques : du 25 juillet au 4 août 1975 on n'observe en effet aucune pluie et il y a augmentation progressive des températures. Le 1er août il a été procédé au fauchage de l'herbe. On doit donc admettre que l'état de la végétation influe fortement sur l'importance des hauteurs d'eau évapotranspirées (Perrier, 1975). Une confirmation a été établie en 1976 sur le bac 3 (fig. 3) où l'herbe à partir du 1er juillet ayant été maintenue rase, l'évapotranspiration a été inférieure à celle de 1975 et peu variable.

IV. — Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux des formules classiques

Parmi les formules classiques, nous envisagerons les plus courantes :

— Celles de Turc et de Thornthwaite qui aboutissent au calcul de l'évapotranspiration maximale, c'est-à-dire, à la quantité d'eau, qui, si les apports étaient suffisants, pourrait être évaporée et transpirée par un couvert végétal.

Les valeurs obtenues par ces formules bien que prévues pour les études à l'échelle de bassins versants nous serviront de référence.

— Celles de Penman qui a pour but la détermination de cette évaporation maximale à partir d'une surface d'eau libre qui, ajustée par un coefficient empirique inférieur à 1, adaptée au climat et à la végétation, permet le calcul de l'évapotranspiration maximale d'une culture.

Les valeurs qui découlent de nos mesures représentent des hauteurs d'eau soustraites à des nappes maintenues à différentes cotes piézométriques sensiblement constantes, alimentées soit naturellement, soit artificiellement.

Elles englobent la partie des précipitations ayant participé à l'infiltration sans faire abstraction des volumes interceptés. Elles peuvent donc être considérées comme l'évapotranspiration réelle à une profondeur prédéterminée de l'aquifère.

Sur les tableaux 1 et 2 et sur les figures 2 et 3 nous avons reporté les valeurs de l'évaporation Penman.

La comparaison avec les valeurs observées conduit aux remarques suivantes :

— Les valeurs de Penman sont inférieures à celles :

- des bacs 1, 2, 3 : sauf en avril 1975 ;
- des bacs 2, 3 : sauf en mai, en octobre 1975, en avril et septembre 1976 ;
- du bac 3 : sauf en juillet et septembre 1975.

— L'évaporation mesurée sur le bac 1 est donc, hormis avril 1975, toujours supérieure à l'évaporation Penman et ceci d'autant plus qu'elle est importante. Les variations restent cependant sensiblement homothétiques (sauf du 1er au 4 août 1975, juste après le fauchage de l'herbe). Ceci revient à constater que, dans le cas de notre expérimentation, le coefficient correctif permettant de passer de l'évaporation Penman à l'évapotranspiration réelle devrait être non inférieur à 1 mais supérieur à l'unité et ceci d'autant plus que l'évaporation est forte. En d'autres termes, le départ d'eau mesuré vers l'atmosphère par l'intermédiaire du sol et de la végétation est plus important que celui correspondant à l'évaporation théorique sur eau libre dans des conditions hygrométriques de l'air données.

Ces constatations devront être vérifiées et peut être réajustées en fonction des données ultérieures fournies par les mesures sur un bac d'eau libre placé dans des conditions d'expérimentation identiques.

Quoi qu'il en soit, ces résultats sont en contradiction avec la formulation classique selon laquelle l'évaporation d'eau libre (représentée ici par l'équation de Penman) constitue une limite maximale pour l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal.

L'explication de cette contradiction apparente peut être recherchée en considérant dans quelles conditions sont obtenues les deux grandeurs mises en comparaison :

— La formule de Penman fait intervenir des relations empiriques pour l'estimation tant du rayonnement global que du rayonnement infra-rouge. En outre son mode de calcul est basé, à l'origine, sur l'équation du bilan d'énergie pour des périodes de temps de l'ordre de la demi-heure ou de l'heure. Le calcul direct à l'échelle journalière à partir de valeurs moyennes introduit donc certaines approximations. Il peut en résulter une erreur systématique qui, même dans le climat méditerranéen d'Avignon, reste généralement inférieure à 10 p. 100 (Seguin, 1975). Même si cette erreur va dans le sens d'une sous-estimation, cet ordre de grandeur est nettement inférieur à celui de la divergence constatée avec nos expérimentations et ne peut constituer une explication suffisante.

— Les résultats expérimentaux pour lesquels toute possibilité d'erreurs accidentelles dues à des fuites non détectées par de nombreux contrôles est à éliminer, ont été obtenus à partir de bacs d'évapotranspiration de 0,27 m^2 de surface. Cette dimension réduite peut induire un effet d'oasis se traduisant par un accroissement marqué de l'évapotranspiration résultant d'un apport d'énergie par advection. Cet effet a été étudié en climat aride et semi-aride : Abdel Aziz *et al.* (1964) ont observé que l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans de telles conditions est supérieure à l'évaporation d'un bac colorado.

D'après Itier et Perrier (1976), des accroissements d'un facteur 2 ou même 3 peuvent être prévus et l'effet observé est d'autant plus fort que la hauteur de la végétation est grande, relativement à la surface de mesure.

La réduction d'évapotranspiration après le fauchage de l'herbe en août 1975 pourrait ainsi s'expliquer en partie, concurremment avec l'effet physiologique qui conduit la plante à ralentir brusquement sa consommation d'eau après une coupe.

Conclusion

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration obtenues expérimentalement sur les bacs renfermant une nappe à des profondeurs de 0,25, 0,50, 0,75 m sous la surface du sol, et par l'application de formules classiques, se traduit pour les 2 années d'observations, par une divergence croissante du printemps à l'été, avec un écart, qui a atteint pour l'aquifère le plus superficiel plus de 200 p. 100 du 28 juillet au 1er août 1975. Certains physiologistes, basant leur raisonnement sur la théorie, généralement admise, d'une régulation qui, dans notre cas, peut être nulle, des pertes en eau par la plante en période sèche, concluent à l'impossibilité d'expliquer de tels résultats hors de conditions particulières de l'environnement introduisant des énergies locales supplémentaires (énergies radiatives ou advectives).

Le dépassement de l'évapotranspiration du couvert végétal par rapport à l'évaporation Penman, peut être expliqué par un effet d'oasis lié au phénomène d'advection. Actuellement, compte tenu des résultats des travaux de physiologistes tels Huck *et al.* (1970), Cruiziat (1974), nous tentons de vérifier cette hypothèse en effectuant des mesures complémentaires pour établir les profils comparés de température et d'humidité au-dessus des bacs et dans l'environnement immédiat.

Reçu pour publication en mars 1978.

Remerciements

Nous remercions bien vivement M. Seguin (Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches Agronomiques, I.N.R.A. Montfavet) des conseils et critiques qu'il nous a apportés.

Summary

Measurement of evapotranspiration. Method and reviews

An experiment on steady level water table at 0,25, 0,50, 0,75 m under soil surface, in tanks fulled with sandy clay material, has permitted to evaluate losses by evapotranspiration and to compare them with those found by classic formulas (Thornthwaite, Turc, Penman).

Zusammenfassung

Messung der Evapotranspiration Methode und Besprechung

Eine Erprobung auf einer freien Wasserfläche, die auf konstanter Höhe auf 0,25, 0,50, 0,75 m unter der Bodenfläche gehalten wind unter verwendung von mit sandigem Ton gefüllten Behältern hat es ermöglicht, die durch Evapotranspiration bewirkten Verluste quantitativ zu erfassen und sie mit den aus den klassichen Formeln abgeleiteten Verlusten zu vergleichen (Thornthwaite, Turc, Penman).

РЕЗЮМЕ

Измерение эвапотранспирации. Методика и критическая оценка.

Г. ЛАКАЗЕДИЕ, Ф. МАЛОРЕН.

Опыты в чанах, заполненных суглинистой почвой, проведенные над свободной скатертью воды, поддерживавшейся на постоянном уровне, на глубине 0,25, 0,50, 0,75 м. от поверхности почвы, позволили вычислить потери влаги от эвапотранспирации, и сравнить полученные результаты с теоритическими величинами, найденными с помощью классических формул (Торнтуайт, Тюрк, Пенман).

Références bibliographiques

ABDEL-AZIZ M. H., TAYLOR S. A., ASHCROFT G. L., 1964. Influence of advective energy on transpiration. *Agron. J.* **56** (2), 139-142.

CRUIZIAT P., 1974. Détermination des pertes en eau subies par les différents organes d'une plante soumise au dessèchement. *Ann. agron.* **25** (4), 539-554.

HUCK M. G., KLEPPER B., TAYLOR M. M., 1970. Diurnal variations in root diameter. *Plant physiol.* **45,** 529-530.

ITIER B., PERRIER A., 1976. Présentation d'une étude analytique de l'advection. II. — Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. *Ann. agron.* **27** (4), 417-435.

PENMAN M. L., 1949. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. *J. Soil Sci.* Vol. I, 75-89.

PERRIER A., 1975. Etude de la température de la surface du sol sous culture. *Ann. agron.* **26** (2), 139-157.

— Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. *Ann. agron.* **26** (1), 1-18 ; **26** (2), 105-123 ; **26** (3), 229-243.

SEGUIN B., 1975. Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France. *Ann. agron.* **26** (6), 671-691.

Ann. agron., 1978, **29** (1), 89-106.

Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la hardt irriguée

II. — Résultats partiels sur cultures de luzerne

R. SPECTY

avec la collaboration technique de J. MEYER et J. L. MEYER

Service d'Expérimentation et d'Information, I.N.R.A.,
Centre de Recherches de Colmar,
68021 *Colmar*

Résumé

Le dispositif expérimental mis en place à Algolsheim en 1966 par la Section SEI de Colmar doit permettre de révéler l'influence de l'action réciproque et concomitante de diverses options intervenant dans l'histoire d'une exploitation. Ces options concernent notamment la rotation et l'irrigation. Il importe, avant la publication d'une étude globale sur ce problème, d'analyser les résultats obtenus sur chacune des cultures. La présentation des résultats concernant la luzerne fait suite à celle déjà publiée et portant sur le maïs grain.

Nous avions vu la nécessité impérative d'irriguer le maïs et d'améliorer en conséquence la nutrition de la plante, notamment par l'implantation d'une luzernière. Nous voyons à présent que cette luzerne ne doit être maintenue plus de deux ans et que son irrigation n'est conseillée qu'entre la 2e et la 3e coupe.

I. — Introduction

Les résultats obtenus sur maïs grain, culture test commune à toutes les rotations, ont déjà fait l'objet d'une publication (Specty, 1975) et le lecteur est prié de bien vouloir s'y reporter. Ils ont notamment montré l'intérêt d'une luzernière. Son implantation dans la rotation permet déjà au maïs qui suit de mieux valoriser l'eau d'irrigation, vraisemblablement par suite d'une meilleure nutrition. Cependant, l'interruption fréquente de rotations céréalières par une culture de type luzerne permet avant tout, par son rôle chimique (enraye dans le cas présent l'apparition d'une carence en zinc) et physique (amélioration de la structure du sol en rotation céréalière), d'éviter la diminution progressive de rendement du maïs. Par ailleurs, le fait de faire revenir le maïs sur lui-même ne se traduit pas par les mêmes effets lorsqu'il y a ou non présence de luzerne dans la rotation. Alors qu'en absence de luzerne, le maïs sur maïs est préférable au maïs sur orge, avec une luzerne, les rendements les plus élevés sont obtenus en maïs de première année. C'est maintenant sur la luzerne, présente dans trois rotations que nous ferons porter l'étude.

II. — Dispositif expérimental adopté (Voir *Ann. agron.* 1975, **26** (2), 169-197.)

Remarque : Divers problèmes d'ordre pathologiques et malherbologiques sont venus perturber les conditions expérimentales. Sur le plan pathologique et quels que soient les traitements, le *Verticillium albo atrum* est responsable d'importants dépérissements mais on relève également la présence d'*Ascochyta imperfecta*, d'*Uromyces striatus* et de *Leptosphaerulina briosiana* sur feuilles. Les mauvaises herbes auraient dû être systématiquement éliminées.

III. — Résultats et discussion

1. — *Données de base sur le climat et le rendement* (tabl. 1, 2 et 3)

Dans le tableau 1 apparaît nettement l'extrême variabilité des précipitations et même dans une certaine mesure de l'évapotranspiration potentielle, donc de l'irrigation.

En tableau 2 sont consignés tous les résultats bruts (issus de 3 ou de 4 — variante 1 — répétitions) obtenus au niveau des traitements en ne prenant en compte en variante 1 de rotation que ceux obtenus en conditions d'enfouissement des résidus de récolte comme c'est uniquement le cas en variantes 2 et 3.

TABLEAU 1

Conditions climatiques à Algolsheim

	Nombre de jours de végétation (1)				Pluies ← (mm)				$\overline{ETPj}^{-1}$ 1/10 mm (2)				Insolation moyenne journalière (1/100 h)				mm d'eau d'irrigation en doses de 30 à 40 mm			
Coupe	1e	2e	3e	4e	1e	2e	3e	4e	1e	2e	3e	4e	1e	2e	3e	4e	1e	2e	3e	4e
1967	50	44	31	38	76	98	23	91	30	35	54	30	75	80	95	65	52	48	131	35
1968	43	47	42	50	58	68	111	157	28	34	40	26	63	68	71	45	20	48	94	27
1969	45	62	28	42	116	145	32	56	25	35	44	25	57	80	76	60	0	49	103	38
1970	48	50	27	42	82	93	43	74	29	36	45	27	60	71	77	65	82	104	120	112
1971	34	50	34	35	19	176	76	58	44	33	48	33	75	69	93	75	40	0	87	37
1972	56	44	41	47	60	90	105	27	29	39	42	32	44	69	58	63	0	80	19	90
1973	64	45	40	41	108	94	105	62	35	44	40	34	58	77	63	60	0	78	38	40
1974	57	51	39	80	32	157	130	117	34	41	58	26	60	70	70	29	0	30	91	80
1975	38	55	35	48	22	174	62	113	39	38	55	29	65	63	83	46	0	65	116	0

(1) Pour 1re, de début végétation à première coupe, puis intervalles entre coupes.
(2) Evapotranspiration moyenne journalière.

TABLEAU 2

Données de base concernant le rendement de la luzerne sur l'ensemble des rotations avec enfouissement
(en t/ha de matière sèche)

rotations		V								V_2								V_3							
an. de cult.		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
irrigation		NI				I				NI				I				NI				I			
1re coupe	1967	1,97	3,40			3,07	4,15			1,65	3,40			2,78	4,15			1,97	3,40			3,07	4,15		
	1968	3,60	5,46	5,70		3,88	4,66	4,69		2,43	4,88	5,70		2,72	3,91	4,69		3,80	5,46	5,70		3,64	4,66	4,69	
	1969	2,57	3,52	2,65	2,95	2,76	3,59	2,64	2,78	3,29	3,38	2,16	2,95	3,31	2,57	2,31	2,78	4,05	3,08	2 65	2,95	3,49	1,97	2,64	2,71
	1970	7,02	5,68	4,34	4,82	5,59	4,53	4,05	4,72	6,40	5,04	5,38	4,57	4,59	4,42	5,71	4,55	7,69	4,78	4,72	4,82	5,05	4,74	5,72	4,72
	1971	3,25	2,40	2,19	0,69	3,37	3,68	2,37	1,86	2,24	1,96	1,96	0,90	2,83	2,77	1,92	1,39	2,42	2,94	2,19	1,26	3,90	3,21	2,16	1,98
	1972	3,60	4,40	3,78	3,61	3,65	4,24	2,77	2,58	3,92	4,81	3,45	3,66	4,10	3,32	2,56	3,08	3,93	3,71	3,93	4,04	4,08	3,99	2,65	2,16
	1973	3,27	4,70	5,21	3,96	3,35	3,41	3,82	2,32	0,90	4,30	4,85	3,14	0,24	3,09	3,24	2,62	1,00	4,66	4,67	3,78	0,21	3,65	3,62	2,85
	1974	2,96	3,61	1,97	1,76	2,98	3,66	1,18	1,12	3,17	2,97	2,43	1,79	3,56	3,50	1,42	1,37	2,98	3,04	2,72	1,94	4,09	3,01	1,65	1,39
	1975	2,93	3,72	4,39	2,65	2,93	2,85	4,14	2,15	2,67	3,28	3,31	2,69	1,94	3,57	3,35	2,21	2,78	3,74	3,80	2,82	2,83	3,66	3,65	1,99
2e coupe	1967	2,20	2,27			3,11	3,29			2,36	2,27			3,18	3,29			2,20	2,27			3,11	3,29		
	1968	2,41	2,67	2,73	2,68	3,64	3,17	3,10		2,46	2,93	2,73		3,13	3,65	3,10		3,31	2,67	2,73		3,96	3,17	3,10	
	1969	3,10	2,43	2,06	1,83	3,31	2,17	2,02	2,86	3,13	2,29	2,14	2,68	3,21	2,19	2,23	2,86	3,54	2,86	2,06	2,68	3,66	2,21	2,02	2,86
	1970	2,59	2,07	1,78	2,91	3,19	2,78	2,36	2,29	2,38	1,90	1,82	1,85	2,05	2,52	1,97	2,08	3,54	2,27	2,32	1,83	2,48	2,67	2,66	2,29
	1971	4,40	3,72	4,04	1,69	3,85	3,53	2,54	2,86	3,25	3,92	3,84	3,20	2,97	3,25	1,68	2,54	4,10	3,85	3,61	3,34	3,60	3,44	1,69	2,27
	1972	2,69	2,38	1,78	0,95	3,97	4,84	2,46	2,59	2,17	2,23	1,54	1,35	4,33	3,53	1,59	2,21	2,25	2,03	1,42	1,40	4,35	3,31	1,94	1,68
	1973	2,61	2,30	2,32	0,50	1,77	2,64	2,60	2,17	1,82	1,88	1,91	1,08	3,26	2,46	2,14	2,10	2,46	2,24	1,43	1,35	4,46	3,42	2,24	2,61
	1974	2,23	2,60	1,26	2,04	3,18	3,82	1,58	0,69	2,34	2,23	1,11	0,95	3,61	3,24	1,06	0,59	2,33	2,25	1,16	1,05	3,17	3,41	1,12	1,12
	1975	2,28	3,52	3,79	2,23	4,11	4,96	4,95	3,09	2,96	3,49	3,38	2,40	4,59	5,06	4,48	3,03	3,10	4,15	3,55	2,27	4,14	5,07	4,72	1,70
3e coupe	1967	0	0			2,42	2,22			0	0			3,06	2,22			0	0			2,42	2,22		
	1968	1,52	1,61	1,66		3,01	2,37	2,35		1,21	1,42	1,66		2,96	1,83	2,35		1,93	1,61	1,66		2,90	2,37	2,35	
	1969	0,14	0,25	0,34	0,29	1,86	1,35	1,26	1,56	0,16	0,47	0,40	0,29	1,85	1,04	1,51	1,56	0,41	0,61	0,34	0,29	1,83	1,30	1,26	1,56
	1970	0,58	0,82	0,54	0,38	1,90	2,30	1,72	1,52	0,58	0,66	0,51	0,37	1,66	2,27	1,78	1,62	0,99	0,77	0,60	0,38	2,07	2,40	1,84	1,52
	1971	1,75	1,52	1,51	0,61	2,95	3,10	2,36	2,24	1,51	1,31	1,33	0,73	2,00	4,24	2,41	2,30	0,82	2,34	1,33	0,88	2,94	3,50	2,39	2,47
	1972	2,77	2,71	2,38	2,05	3,00	2,66	2,27	2,40	2,84	2,26	2,06	2,22	2,78	1,77	2,12	2,98	3,31	2,29	2,09	2,06	2,80	2,13	2,27	2,12
	1973	2,12	2,06	1,71	1,22	1,97	1,63	1,72	2,10	2,65	2,07	1,29	0,78	2,87	1,86	1,31	1,86	2,81	1,79	1,40	1,15	2,58	1,91	1,46	1,85
	1974	0,94	1,11	0,54	0,18	3,18	3,04	1,77	0,68	1,03	1,09	0,79	0,29	3,42	3,49	1,66	1,33	1,21	1,18	0,59	0,30	3,20	3,50	1,58	1,70
	1975	0,63	0,84	1,01	0,50	3,36	3,21	3,05	1,87	0,76	0,84	0,79	0,52	3,76	3,51	3,07	1,68	1,28	1,08	0,97	0,63	3,65	3,62	3,07	0,86
4e coupe	1967	1,08	1,10			1,75	1,53			1,06	1,10			1,48	1,53			1,08	1,10			1,75	1,53		
	1968	2,30	1,75	1,77		1,69	1,51	1,55		2,10	1,95	1,77		1,79	1,59	1,55		2,13	1,75	1,77		1,67	1,51	1,55	
	1969	0,89	0,82	0,35	0,22	2,01	1,26	0,89	1,17	0,94	0,74	0,48	0,22	1,94	1,14	0,96	1,17	1,06	0,78	0,35	0,22	1,90	0,98	0,89	1,17
	1970	0,78	0,80	0,24	0,28	1,72	1,14	1,07	0,98	0,66	0,61	0,39	0,36	1,06	1,07	0,95	1,00	0,83	0,72	0,45	0,28	0,99	1,14	1,17	0,98
	1971	1,45	1,20	1,40	0,54	1,86	1,52	2,09	1,63	1,32	1,08	1,26	0,55	1,60	1,47	2,12	1,64	1,42	1,29	1,32	0,91	1,85	1,53	1,82	1,80
	1972	0	0	0	0	1,79	1,24	0,61	0,58	0	0	0	0	1,35	1,16	0,46	0,58	0	0	0	0	1,43	1,14	0,54	0,50
	1973	1,09	0,84	0,52	0,37	1,70	1,15	0,78	1,18	0,97	0,73	3,60	0,52	1,46	1,27	4,81	1,00	0,94	0,81	3,56	0,46	1,57	1,28	6,45	0,80
	1974	0,19	0,19	0,05	0,01	0,90	1,10	0,76	0,19	0,25	0,30	0,10	0,13	0,89	1,03	0,68	0,32	0,21	0,31	0,14	0,09	0,94	0,94	0,54	0,59
	1975	1,93	2,03	2,22	0,95	1,76	1,65	1,58	1,31	1,53	1,69	2,03	2,36	1,69	0,96	1,39	1,43	1,62	1,91	2,16	2,20	1,64	1,35	1,44	0,80

Dans le tableau 3, les deux options retenues en variante 1 (avec et sans enfouissement des résidus de récolte) sont prises en considération.

TABLEAU 3

Données de base concernant le rendement de la luzerne en variante 1 *de rotation* (en t/ha de matière sèche)

An. de cult.		1	3	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
enfouissem.		NE				E				NE				E			
irrigation		NI								I							
1re coupe	1967	1,88				1,97				2,68				3,07			
	1968	3,25	6,14			3,60	5,46			3,34	5,17			3,88	4,66		
	1969	2,50	5,12	2,47		2,57	3,52	2,65		2,78	3,13	2,18		2,76	3,59	2,64	
	1970	5,96	5,40	4,22	4,12	7,02	5,68	4,34	4,82	4,94	5,00	3,99	3,58	5,59	4,53	4,05	4,72
	1971	2,41	2,60	2,28	1,01	3,25	2,40	2,19	0,69	3,23	3,94	2,28	1,54	3,37	3,68	2,37	1,86
	1972	3,27	4,19	3,82	3,61	3,60	4,40	3,78	3,61	2,88	4,47	2,73	2,80	3,65	4,24	2,77	2,58
	1973	2,68	4,43	5,25	4,19	3,27	4,70	5,21	3,96	2,80	2,69	4,28	2,32	3,35	3,41	3,82	2,32
	1974	3,21	3,62	1,83	1,75	2,96	3,61	1,97	1,76	2,71	3,67	0,89	1,03	2,98	3,66	1,18	1,12
	1975	2,45	3,58	4,08	2,32	2,93	3,72	4,39	2,65	2,53	2,97	3,84	1,72	2,93	2,85	4,14	2,15
2e coupe	1967	2,37				2,20				3,38				3,11			
	1968	2,27	2,81			2,41	2,67			3,05	3,60			3,64	3,17		
	1969	3,14	2,63	2,23		3,10	2,43	2,06		3,19	2,34	1,81		3,31	2,17	2,02	
	1970	2,32	2,11	1,97	1,64	2,59	2,07	1,78	1,83	2,68	2,54	2,25	2,03	3,19	2,78	2,36	2,29
	1971	3,89	3,64	3,92	3,06	4,40	3,72	4,04	2,91	3,93	3,43	2,29	2,76	3,85	3,53	2,54	2,86
	1972	2,45	2,38	1,71	1,74	2,69	2,38	1,78	1,69	4,31	4,37	2,30	2,83	3,97	4,84	2,46	2,59
	1973	2,34	2,27	2,25	0,96	2,61	2,30	2,32	0,95	2,66	2,72	2,55	2,19	1,77	2,64	2,60	2,17
	1974	2,21	2,39	1,03	0,61	2,23	2,60	1,26	0,50	3,67	3,53	1,44	0,49	3,18	3,82	1,58	0,69
	1975	2,43	3,79	3,64	1,85	2,28	3,52	3,79	2,23	3,66	4,37	4,67	3,19	4,11	4,96	4,95	3,09
3e coupe	1967	0				0				1,54				2,42			
	1968	1,51	1,45			1,52	1,61			2,65	1,89			3,01	2,37		
	1969	0,10	0,29	0,18		0,14	0,25	0,34		1,92	1,30	0,94		1,86	1,35	1,26	
	1970	0,54	0,88	0,53	0,27	0,58	0,82	0,54	0,38	1,60	2,26	1,40	1,32	1,90	2,30	1,72	1,52
	1971	1,40	1,56	1,53	0,61	1,75	1,52	1,51	0,61	3,00	3,42	2,43	1,97	2,95	3,10	2,36	2,24
	1972	2,64	2,65	2,53	2,14	2,77	2,71	2,38	2,05	2,57	2,93	2,04	2,68	3,00	2,66	2,27	2,40
	1973	1,68	1,69	1,55	1,25	2,12	2,06	1,71	1,22	1,11	1,47	1,55	1,84	1,97	1,63	1,72	2,10
	1974	0,89	1,02	0,55	0,21	0,94	1,11	0,54	0,18	2,82	3,00	1,71	0,55	3,18	3,04	1,77	0,68
	1975	0,58	0,87	0,90	0,41	0,63	0,84	1,01	0,50	3,38	2,95	3,05	1,92	3,36	3,21	3,05	1,87
4e coupe	1967	1,15				1,08				2,10				1,75			
	1978	2,15	1,94			2,30	1,75			1,79	1,58			1,69	1,51		
	1969	0,84	0,80	0,27		0,89	0,82	0,35		1,80	1,30	0,71		2,01	1,26	0,89	
	1970	0,73	0,79	0,47	0,19	0,78	0,80	0,24	0,28	1,51	1,21	0,98	0,73	1,72	1,14	1,07	0,98
	1971	1,33	1,32	1,39	0,53	1,45	1,20	1,40	0,54	1,85	1,55	2,19	1,67	1,86	1,52	2,09	1,63
	1972	0	0	0	0	0	0	0	0	1,52	1,33	0,57	0,76	1,79	1,24	0,61	0,58
	1973	0,78	0,77	0,81	0,39	1,09	0,84	0,52	0,37	1,23	1,04	0,70	0,96	1,70	1,15	0,78	1,18
	1974	0,20	0,17	0,09	0,01	0,19	0,19	0,05	0,01	0,88	0,97	0,70	0,20	0,90	1,10	0,76	0,19
	1975	1,98	1,85	2,22	1,64	1,93	2,03	2,22	0,95	1,71	1,73	1,62	1,42	1,76	1,65	1,58	1,31

NE : non enfoui ; E : enfoui ; NI : non irrigué ; I : irrigué.

2. — *Signification des effets*

2.1. — *Signification de l'effet des traitements « irrigation » (I) et « enfouissement » (E) appliqués au niveau des soles de cultures* (tabl. 4).

L'interprétation statistique porte d'abord sur les résultats obtenus au niveau de chaque sole. Il s'agit d'une analyse en blocs pour les variantes 3 et 4 de rotation 1. Les résultats sont consignés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Nombre d'années de signification de l'effet des traitements appliqués au niveau des soles (de 1967 à 1975)

			1re année					2e année						
	Signification		I			E	I × E	I × E	E	I			signification	
	rotations		V_1	V_2	V_3	V_1	V_1	V_1	V_1	V_3	V_2	V_1	rotations	
1re année	coupes	1re	3	4	1	1	0	0	0	1	4	5	1re	coupes — 2e année
		2e	6	4	2	0	0	2	2	3	4	6	2e	
		3e	7	6	5	1	1	0	1	4	6	8	3e	
		4e	8	4	4	1	0	1	0	4	6	8	4e	
	total		8	7	5	2	1	0	0	4	5	5	total	
	total		7	4	5	1	1	0	1	4	3	6	total	
4e année	coupes	4e	9	7	7	1	1	0	1	6	6	7	4e	coupes — 3e année
		3e	9	8	7	0	1	1	1	7	5	7	3e	
		2e	5	3	1	1	1	0	1	5	3	6	2e	
		1re	5	0	2	1	0	0	1	2	2	4	1re	
	rotations		V_1	V_2	V_3	V_1	V_1	V_1	V_1	V_3	V_2	V_1	rotations	
	signification		I			E	I × E	I × E	E	I			signification	
	4e année							3e année						

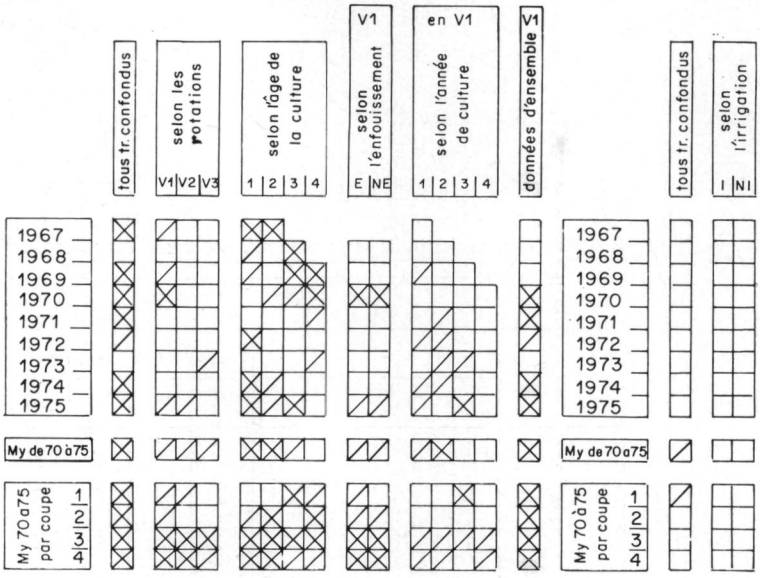
Traitements : I : irrigation ; E : enfouissement.
Rotations :
V_1 : 4 années de luzerne après maïs, maïs, blé dur, orge ;
V_2 : 4 années de luzerne après maïs, pois, colza, blé d'hiver ;
V_3 : 4 années de luzerne après maïs, pois et haricot, blé d'hiver, orge.

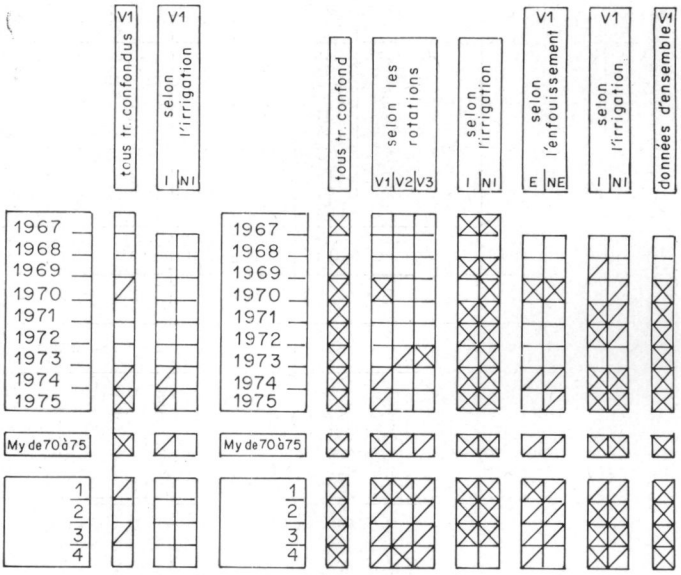
Si l'effet des traitements était toujours mesurable, le chiffre 9 (présence de 9 années de relevés) devrait apparaître partout, ce qui est loin d'être le cas.

En matière *d'irrigation* cela n'apparaît pas pour la 3e et 4e coupe de 4e année. On comprend bien que l'effet « irrigation » ne soit pas toujours mesurable en 1re et même en 2e coupe de luzerne ; les conditions climatiques ne nécessitent parfois pas d'irriga-

TABLEAU 5

Signification de l'effet général de l'irrigation, de la rotation, de l'enfouissement et de l'année de culture





Non significatif.

Significatif à 5 p. 100.

Significatif à 1 p. 100.

tion avant que la 2e coupe n'ait été effectuée, mais cela n'explique pas tout, car il en est souvent de même sur la somme des coupes. Signalons également que l'effet « irrigation » est plus souvent significatif en luzernière de 1re puis de 4e année d'une part, en luzernière de variante 1 d'autre part.

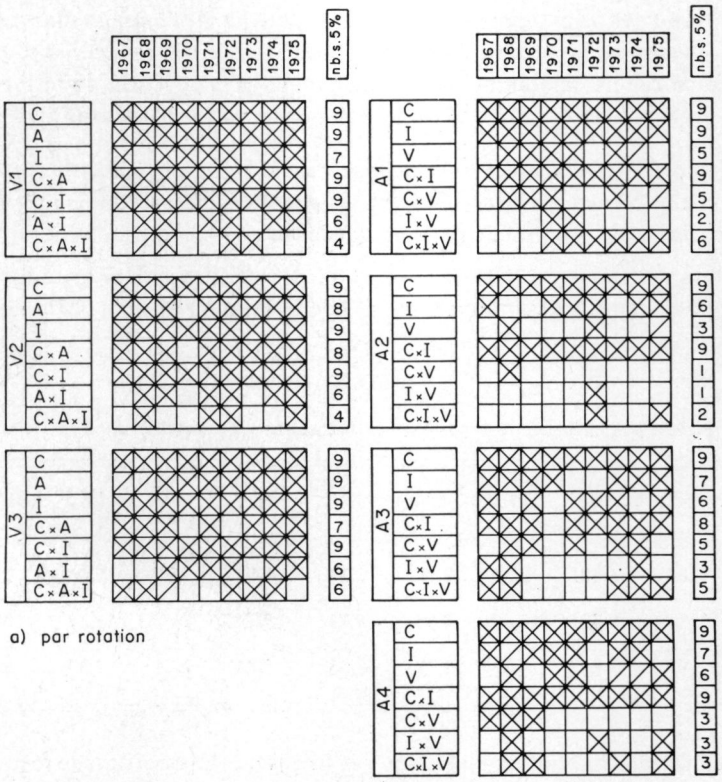
L'effet *enfouissement* ainsi que de l'interaction I × E n'est que très rarement mesurable et aucune conclusion ne paraît pouvoir être tirée à ce sujet.

2.2. — *Signification générale de l'effet des traitements « irrigation » (I), « variante » (V), « âge » (A), au niveau du dispositif expérimental* (tabl. 5).

L'essai étant balancé, il est possible, au niveau du dispositif, de considérer les traitements, autres que ceux dont on veut étudier la signification, comme des répétitions. Nous avons analysé de cette manière, l'effet de l'irrigation, de la rotation, de l'enfouis-

TABLEAU 6

Signification des divers traitements et interactions sur l'ensemble des rotations



a) par rotation

b) par âge de la culture

☐ Non significatif.

☒ Significatif à 5 p. 100.

⊠ Significatif à 1 p. 100.

C : coupe.
I : irrigation.
A : âge de la culture.
V : variante de rotation.
E : enfouissement.

sement et de l'âge de la culture pour chaque année sidérale sur le total des coupes. Pour la moyenne de 1970 à 1975, l'étude statistique a porté sur chacune des coupes. Le nombre de répétitions et ainsi de degrés de liberté va en diminuant lorsque l'on prend en considération un nombre croissant de traitements ; c'est ainsi par exemple, que pour l'étude de l'effet de l'irrigation, tous traitements confondus, il est de 12, mais que, pour cette étude par année de culture, il n'est plus que de 2. Dans le tableau 5 la finesse de l'étude statistique n'est donc pas homogène.

Compte tenu de l'observation précédente, nous pouvons dire que si globalement, tous traitements confondus, *l'irrigation* a un effet mesurable, sauf les années humides (1968, 1973), la diminution de précision dans l'analyse est immédiatement ressentie et les mêmes observations que celles formulées à la lecture du tableau 4 peuvent être énoncées. C'est au niveau de la 2e coupe que l'effet de l'irrigation est le moins évident, or l'absence d'irrigation jusqu'à la 1re coupe est relevée 6 fois, jusqu'à la 2e coupe 1 fois *. On peut se demander quel est le sens de cet effet.

En ce qui concerne la *rotation*, une petite tendance se manifeste en moyenne sur la 1re coupe de luzerne.

Si au niveau des soles aucune conclusion ne pouvait être tirée en matière d'*enfouissement*, une tendance favorable à cette pratique semble commencer à se manifester.

L'*année de culture* semble influencer nettement la production de la luzerne, mais lorsque la précision de l'analyse diminue cette observation est moins évidente.

2.3. — *Signification de l'effet des traitements, « coupe » (C), « irrigation » (I), « âge » (A), « variante » (V), « enfouissement » (E), et de leurs interactions par facteur de production* (tabl. 6 — non intégralement reproduit — et 7).

L'analyse statistique porte enfin sur les interactions du premier et du second degré, d'une part pour toutes les rotations (tabl. 6) et d'autre part pour la variante 1 (tabl. 7),

TABLEAU 7

Effet de l'irrigation sur le rendement de la luzerne (M. S. t/ha) selon les années

	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	Moyenne
NI ..	5,96	10,93	6,58	8,75	8,16	8,24	8,52	5,21	9,03	3,73	7,51
I ...	10,80	11,66	8,22	10,30	9,95	9,72	9,24	7,75	11,31	9,37	9,83
Δ ...	4,84 ··	0,73	1,64 ··	1,55 ··	1,79 ··	1,48 ·	0,72	2,54 ··	2,28 ··	5,64	2,32

la seule à comporter le traitement E. Nous en tirons à cette occasion de façon assez fine des compléments d'explications sur le mode d'action des traitements qui les composent. Ceci apparaît par rotation (tabl. 6*a*), par année de culture (tabl. 6*b* et 7*a*), par options en matière d'irrigation (tabl. 6*c* et 7*b*), et par coupe (tabl. 6*d* et 7*c*). Nous portons, pour le cycle de 9 ans, le nombre d'années où la signification apparaît.

* Remarque : la quantité d'eau est calculée de manière à combler le déficit lorsque ce dernier, évalué à partir de la formule du Piche corrigé (Bouchet) atteint théoriquement 30 à 40 mm.

Le type de représentation graphique utilisé visualisant les résultats non seulement dans le détail, mais également de façon globale, permet de faire ressortir rapidement les points marquants et d'effectuer facilement des comparaisons.

Les observations les plus marquantes concernent l'absence de signification de l'effet « enfouissement » et des interactions qui en sont issues, la rare signification de l'effet rotation et des interactions incluant ce facteur. Par contre, on mesure toujours des différences effectives de rendement selon les coupes, et presque toujours, selon l'absence ou la présence d'irrigation. Les interactions « coupe × autres facteurs de production » sont pour ainsi dire toujours significatives.

3. — *Effets principaux*

3.1. — *Effet « coupe »* (fig. 1 à 4).

Le rendement de la luzerne chute de la 1re à la 4e coupe. Nous avons donc en

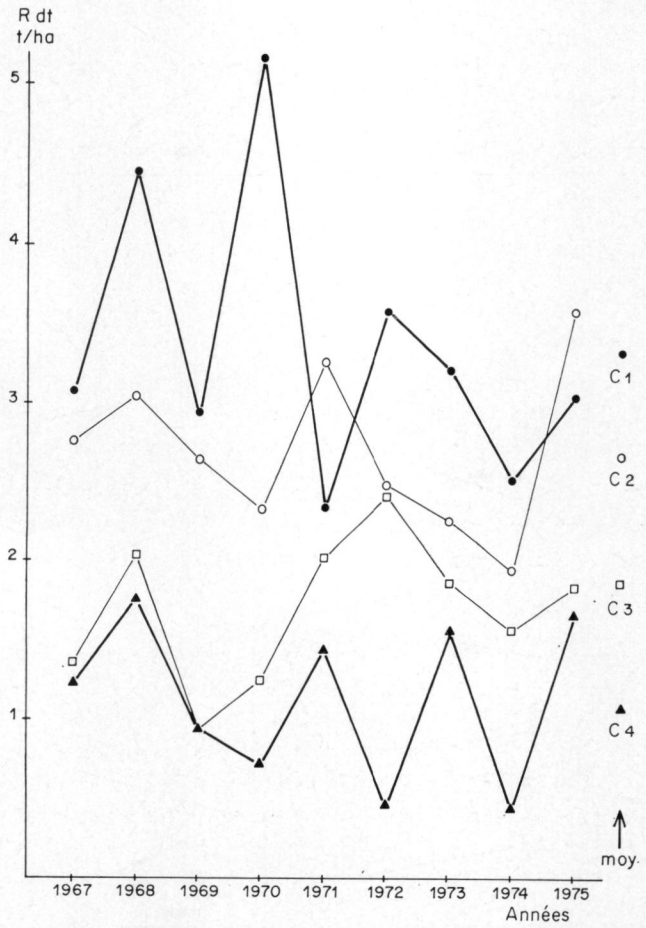


FIG. 1. — *Effet « coupe » tous traitements confondus.*

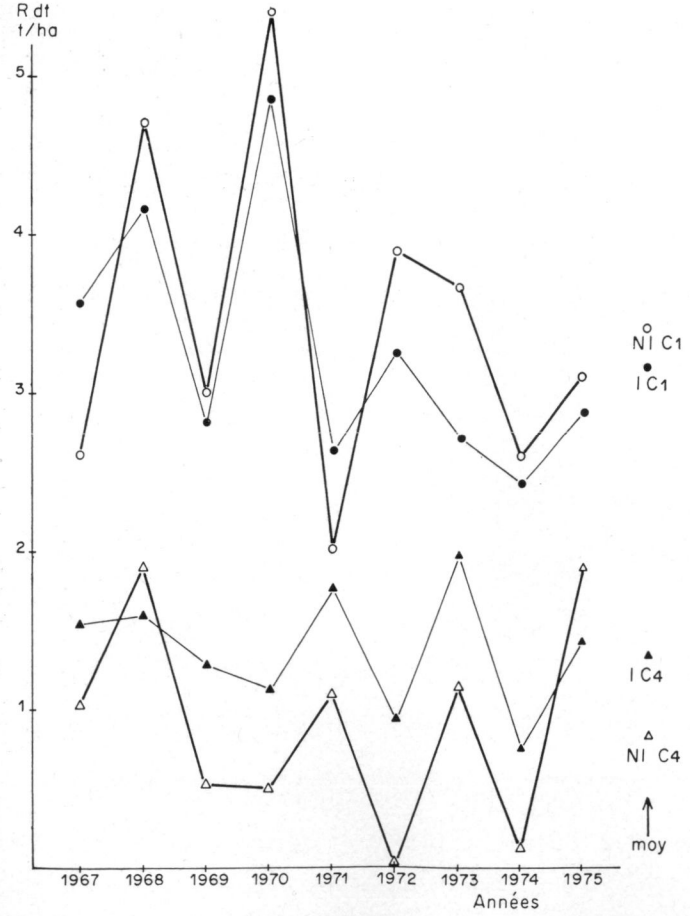


FIG. 2. — *Effet « coupe » selon l'irrigation.*

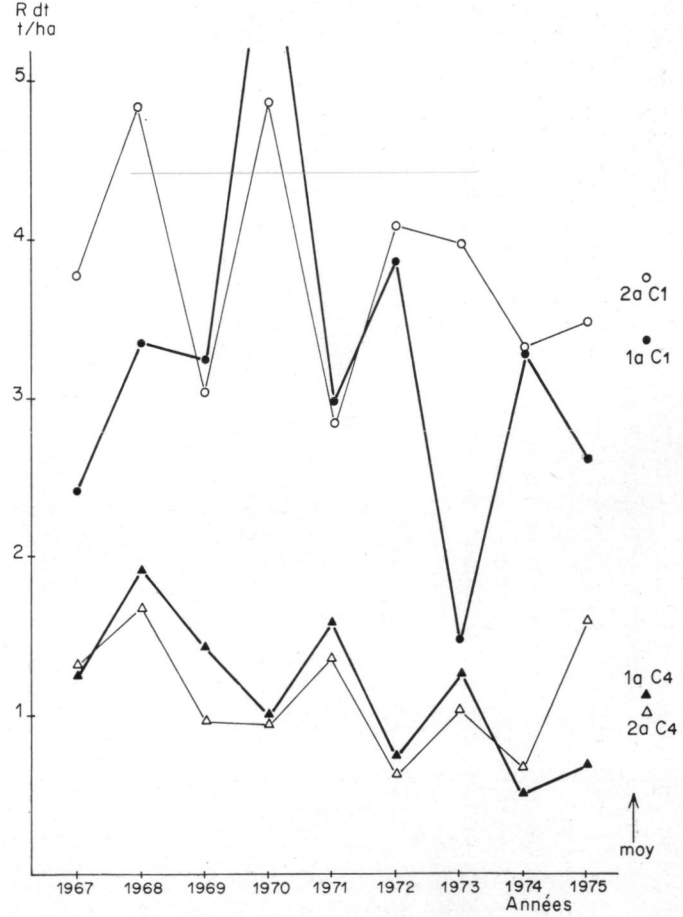


FIG. 3. — *Effet « coupe »* (1re *et* 4e) *selon l'âge de culture* (1*a et* 2*a*).

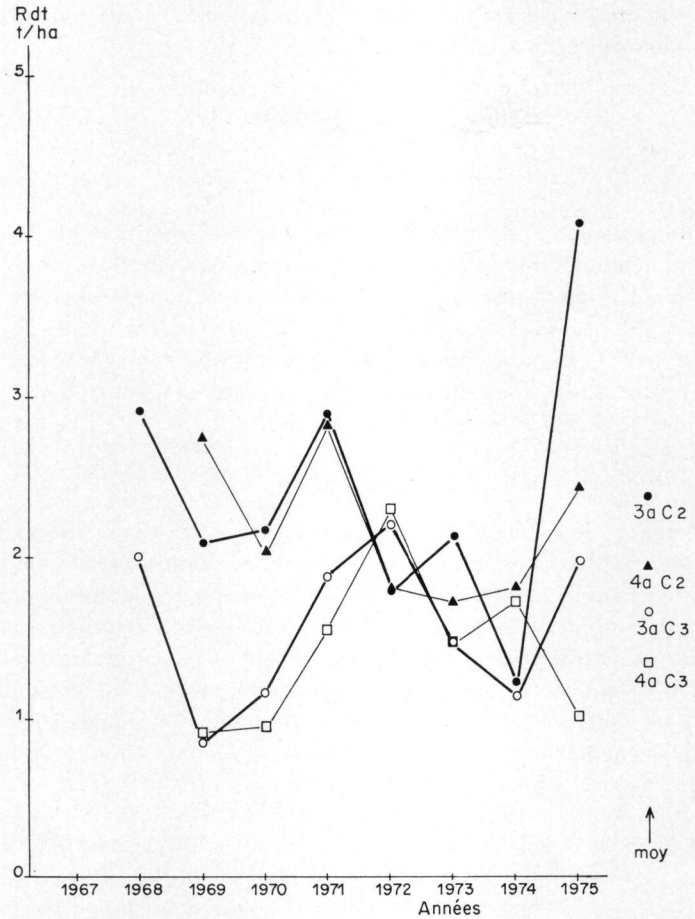


FIG. 4. — *Effet « coupe » (2e et 3e) selon l'âge de la culture (3a et 4a).*

moyenne (1970 à 1976) les rendements suivants (exprimés en tonnes de matière sèche à l'hectare) :

1re coupe	2e coupe	3e coupe	4e coupe
3,20	2,48	1,78	1,08

Ceci est vrai quels que soient les traitements : en irrigué comme en non irrigué, en 1re comme en 2e, 3e ou 4e année de culture, en 1re comme en 2e ou 3e variante de rotation. Il peut cependant arriver que, dans des conditions climatiques particulières, l'ordre ne soit pas respecté.

On comprend bien l'augmentation importante de rendement due aux pluies sur une luzernière non irriguée pleine de réserve. Quant à l'augmentation de rendement en luzerne irriguée, elle serait à imputer à la diminution de la demande en eau du climat ($\overline{ETP}\ j^{-1} = 4{,}4$ mm pour la 1re coupe, 3,3 mm pour la 2e coupe).

L'écart de rendement entre les coupes est généralement plus important en NI que sous irrigation (fig. 2).

Nous avons ainsi en moyenne (1970 à 1976) les rendements suivants (exprimés en tonnes de matière sèche à l'hectare) :

	1re coupe	2e coupe	3e coupe	4e coupe
NI	3,38	2,10	1,17	0,72
I	3,03	2,84	2,37	1,44

Ainsi l'irrigation estompe l'effet coupe, essentiellement en diminuant le rendement de la 1re et en augmentant le rendement de la 3e coupe. Cependant, l'écart est avant tout variable, les pluies n'étant pas tous les ans réparties de même façon de la 1re à la 4e coupe.

Si ce n'est en 1973 où nous obtenons des résultats aberrants (la luzerne a dû être réensemencée par suite d'une mauvaise levée), l'année de culture a peu d'influence sur l'effet coupe. Il en est de même de la rotation.

3.2. — *Effet « irrigation »* (tabl. 7 et 8 ; fig. 2, 5 et 6).

L'augmentation de rendement due à l'irrigation est, toutes choses égales par ailleurs, variable selon les années. Elle est en moyenne relativement faible et ne peut à elle seule justifier l'équipement à l'irrigation. En 1re coupe, l'irrigation se traduit même par une diminution significative de la production. Y a-t-il en conditions irriguées épuisement des réserves ou perturbation de la recolonisation au printemps en Rhizobium des racines ? L'irrigation fut exceptionnellement favorable à la 1re coupe en 1971 par suite de la très faible pluviométrie naturelle (19 mm pour 34 j de végétation). C'est la 3e coupe qui bénéficie le plus de l'irrigation ; c'est aussi l'époque de la plus forte consommation en eau. Nous obtenons en moyenne les différences de rendement (Δ rdt I-NI en t/ha de 1970 à 1976) suivantes : 1re coupe = — 0,35·· ; 2e coupe = 0,74·· 3e coupe = 1,28·· ; 4e coupe = 0,72··. L'effet néfaste de l'irrigation en 1re coupe est surtout visible sur luzerne de 3e et 4e année, l'effet bénéfique en 3e coupe est particulièrement apparent sur luzerne de 1re et de 2e année. Les résultats sont consignés dans le tableau 8.

TABLEAU 8

Effet de l'irrigation selon les coupes et l'âge de la culture (rdt I-NI en t/ha de 1970 à 1976)

	1re coupe	2e coupe	3e coupe	4e coupe
1re année ...	— 0,18	0,96 *	1,28	0,84 **
2e année	— 0,25	1,03 **	1,43 **	0,69 **
3e année	— 0,51 **	0,37	1,02 **	0,77 **
4e année	— 0,48 **	0,58	1,07 *	0,58 *

L'effet de l'irrigation sur luzerne est le même quelle que soit la variante de rotation.

La représentation en valeurs cumulées (graphique non reproduit) de la production d'une luzernière mise en place pour 4 ans selon ou non l'adoption de l'irrigation

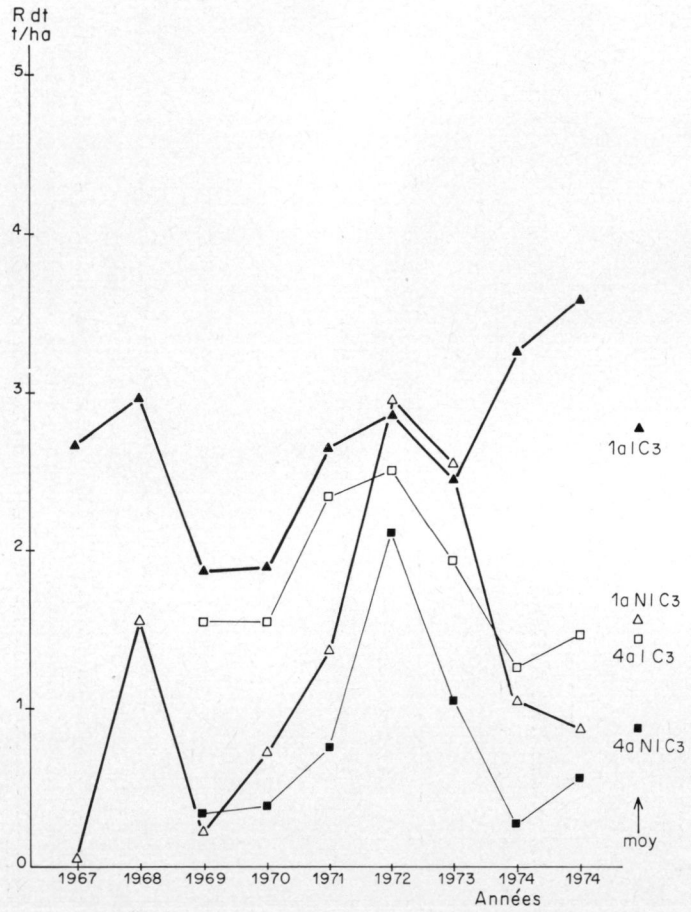


FIG. 5. — *Effet « irrigation » (I) en 1re coupe de 4e année.*

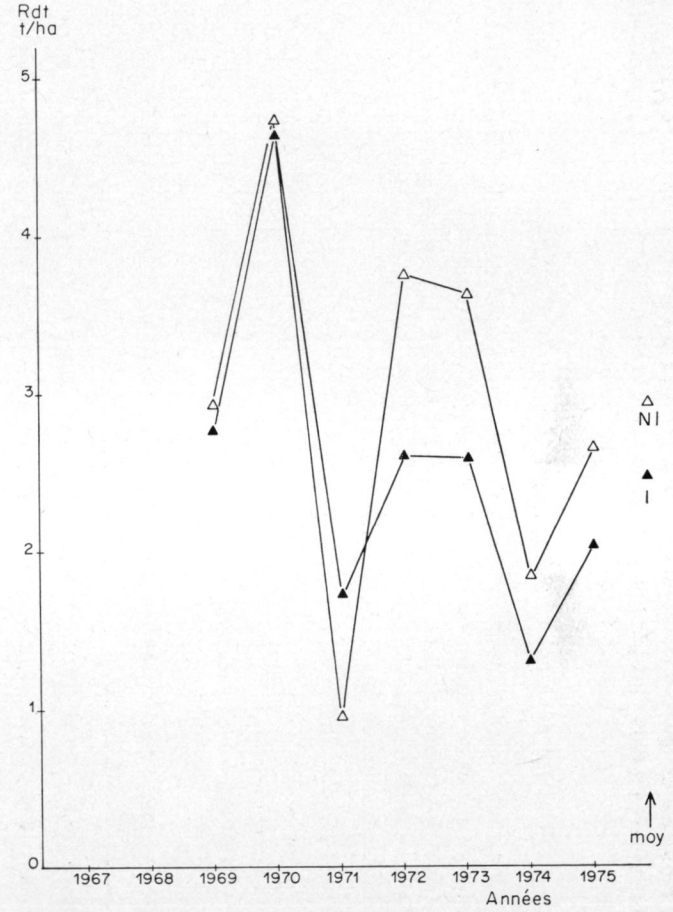


FIG. 6. — *Effet « irrigation » (I) en 3e coupe de 1re et 4e année.*

permet d'observer que les courbes obtenues ne sont pas très éloignées l'une de l'autre et que parfois, à la faveur des pluies, elles se rapprochent. Tout se passe comme si un facteur autre que l'irrigation venait limiter le rendement.

3.3. — *Effet « âge de la culture »* (tabl. 9 et 10 ; fig. 7).

Une chute de rendement apparaît généralement sur luzerne de 3 ans. Il arrive cependant que certaines années (1973, 1975), elle ne se manifeste que pour une luzerne âgée de 4 ans comme nous pouvons le voir au tableau 9. La reprise qui apparaît parfois n'est due qu'à un envahissement de la luzernière par les mauvaises herbes. Ceci est valable quelle que soit la coupe (tabl. 10).

TABLEAU 9

Effet « âge de la culture » sur le rendement de la luzerne (M. S. t/ha) selon les années

	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	moyenne
1re année	7,80	10,69	9,07	11,06	10,27	10,85	8,01	8,83	10,04	6,57	9,32
2e année	8,96	11,43	7,17	9,68	10,44	10,02	9,36	9,10	11,57	7,54	9,53
3e année		11,76	6,11	9,01	8,59	7,44	11,11	4,64	11,62	5,97	8,47
4e année			7,26	8,34	6,92	7,59	7,04	3,35	7,44	6,34	6,78

TABLEAU 10

Evolution moyenne (1970 à 1976) du rendement de la luzerne (M. S. t/ha) au cours du temps

	1re coupe	2e coupe	3e coupe	4e coupe
1re année...	3,29	3,62	3,22	2,67
2e année ...	2,87	2,92	2,21	1,88
3e année ...	2,07	2,08	1,59	1,34
4e année ...	1,14	1,04	1,31	0,82

La chute de rendement est partiellement liée à la sensibilité particulière de la variété (FD 100) au *Verticillium*. D'après les résultats d'analyse de la luzerne à la récolte, toutes coupes confondues (tabl. 11) et de celles des sols après 4 ans de luzerne, toutes répétitions confondues (tabl. 12), la fertilisation ne semble pas en cause. Notons cependant dans la plante, une baisse sensible du taux de potassium ainsi qu'une teneur assez peu élevée en magnésium.

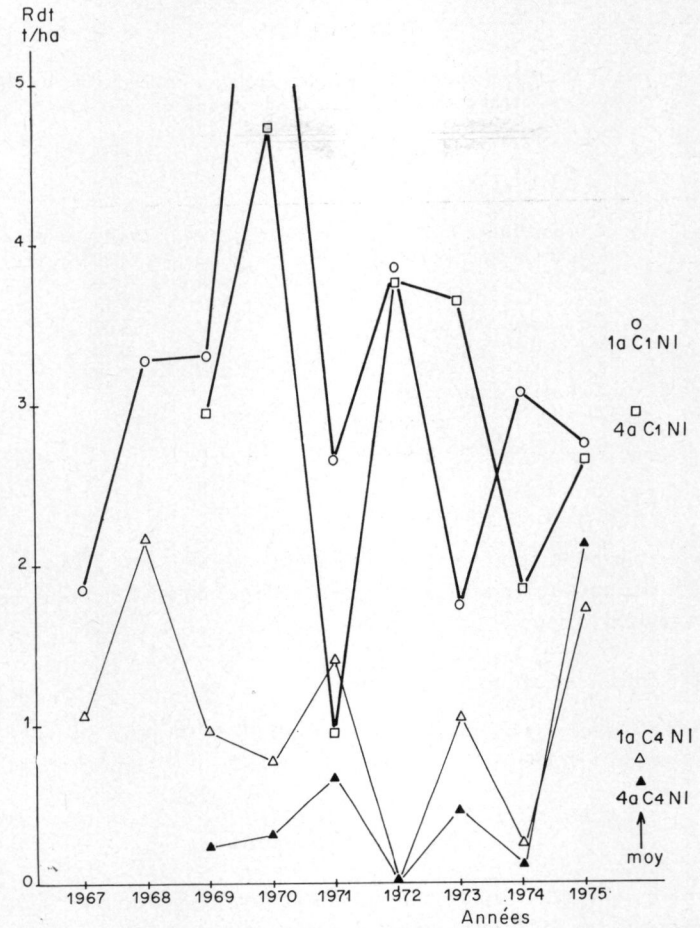


FIG. 7. — *Effet âge (1a et 4a) en non irrigué (NI) sur la 1re et la 4e coupe (C_1, C_4).*

TABLEAU 11

Analyses de luzerne à la récolte (début floraison)
toutes coupes confondues (valeurs fournies par la Station d'Agronomie de Colmar)

	Age	Teneurs en p. 100					En p. p. m.		
		N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Zn
I	1re année ..	3,49	0,32	3,23	2,09	0,23	13	85	84
	2e année ..	3,52	0,34	3,13	2,10	0,23	14	94	73
	3e année ...	3,30	0,32	2,75	2,23	0,20	18	121	72
	4e année ...	3,21	0,28	2,17	2,50	0,26	17	86	68
NI	1re année ...	3,56	0,32	3,09	2,00	0,19	16	123	63
	2e année ...	3,56	0,31	2,84	2,07	0,20	14	125	57
	3e année ...	3,17	0,31	2,70	2,10	0,18	19	160	55
	4e année ...	3,02	0,28	2,23	2,49	0,24	19	118	50

TABLEAU 12

Analyses de sol après 4 ans de luzerne toutes répétitions confondues en V_1 NE
(valeurs fournies par la Station d'Agronomie de Colmar)

	NI	I
C organique p. 1 000	16,46	14,12
Matière organique p. 1 000	28,33	24,30
N	1,72	1,56
C/N	9,6	9,1
Ca échangeable méq p. 100	27,74	26,02
Mg — —	0,71	0,93
K — —	0,69	0,48
Cu total p. p. m.	23	17
Zn total —	104	109

3.4. — *Effet « Variante de rotation ».*

La production de la luzerne située en rotation de variante 2 semble légèrement déficitaire par rapport aux deux autres, particulièrement en 1re coupe. Les repousses de colza en seraient la cause.

3.5. — *Effet « enfouissement des résidus de récolte ».*

Un très léger effet significativement favorable (0,31 t/ha) fut observé en 1975 lors de la 1re coupe de luzerne non irriguée.

IV. — Conclusions

Particulièrement utile au maïs qui la suit (Marty et Fioramonti, 1970 ; Mériaux, 1971 ; Marty et Hilaire, 1972 ; Specty, 1975) la luzerne est certainement la culture de la rotation dont la maintenance nous pose le plus de problèmes. Sa production est en moyenne très faible. Les coupes se succèdent en apportant de moins en moins de produit. L'irrigation stabilise ou plus exactement uniformise la production plus qu'elle ne l'augmente.

C'est ainsi que l'effet de l'irrigation est favorable en 3e coupe et néfaste en 1re coupe. Dans les conditions locales et avec du matériel végétal classique, la luzernière a des difficultés à se maintenir plus de 2 ans ; une chute de rendement importante s'observe en 3e année de culture.

Tout se passe comme si, dans ce type de sol, les réserves de la luzernière étaient vite épuisées et toutes les pratiques concourant à une intensification de la production ne peuvent être conduites qu'avec circonspection. Il semble que l'effet favorable de l'irrigation soit autant imputable à une diminution de la demande en eau du climat au niveau du feuillage qu'à une satisfaction de l'offre au niveau des racines. L'état physiologique parfois assez déplorable de la luzerne nous fera choisir des variétés résistantes au *Verticillium* (Prima, Verneuil, Vertus, Lutèce, Sverre...).

Le problème qui se pose à présent est d'ordre économique. Si la luzerne ne semble pas intéressante pour elle-même, elle se traduit à terme par un effet bénéfique sur les

autres cultures de la rotation (notamment le maïs et plus spécialement le maïs irrigué) et sur la rotation elle-même dont elle valorise l'intensification. A-t-on financièrement intérêt à l'introduire dans l'assolement ? Si à court terme la réponse est négative, à long terme on peut vraisemblablement dire oui en tenant compte des conseils de culture précédemment énoncés. Reste à fixer la date de maximisation du revenu en précisant l'évolution admissible du manque à gagner. Cette étude qui doit aboutir à des propositions d'assolement incluant de la luzerne diversement valorisée a déjà commencé.

Reçu pour publication en mars 1978.

Summary

Study of the accumulative effects and after effects of several agronomical factors applied within the framework of rotations possible in the irrigated Hardt region.

II. — Incomplete results on lucern crops

The experimental device set up in Agolsheim in 1966 by the SEI branch of Colmar should reveal the influence of the reciprocal and concomitant action of the various options involved in a farming history. These options concern in particular crop rotation and irrigation. It is essential that the results obtained on each culture should be analysed before the publishing of a global study on this problem. The presentation of the results relative to lucerne follows up the results already published on grain maize.

We stated the imperative necessity to irrigate maize and consequently to improve the plant nutrition in particular by the introduction of a lucerne field. We now observe that this lucerne shall not be proceeded with more than two years and that its irrigation is recommended only between the second and third cut.

Zusammenfassung

Über kumulierte Folgen und Nachwikungen mehrerer, im Rahmen von möglichen Fuchtfolgen in der bewässerten Hardt, angewendeten agronomischen Faktoren

Die Versuche, die seit 1966 in Algolsheim von der S.E.I. stelle in Colmar durchgeführt werden, sollen es erlauben den Einfluss der gegenseitigen und begleitenden Wirkungen, verschiedener Wirtchaftsrichtungen, die in der Geschichte eines landwirtschaftlichen Betriebes auftreten, zu ermitteln. Diese Wirtschaftsrichtungen beziehen sich namentlich auf Fruchtfolge und Bewässerung. Bevor eine Gesamtabhandlung über diese Fragen herausgegeben wird, ist es wichtig die einzelnen, auf den verschiedenen Kulturpflanzen erzielten Ergebnisse, zu untersuchen. Die hier unterbreiteten Teilergebnisse beziehen sich auf Luzerne und folgen denen die in bezug auf Körnermais schon veröffentlicht wurden.

Wir haben festgestellt, dass es unbedingt notwendig ist den Mais zu beregnen und zu gleicher Zeit, namentlich durch Einfügen von Luzerne in die Fruchtfolge, die Pflanzenernährung zu fördern.

Wir zeigen nun, dass man Luzerne nicht länger als zwei Jahre beibehalten soll und dass die Bewässerung dieser Kulturpflanze nur zwischen dem ersten und zweiten Schnitt angebracht ist.

РЕЗЮМЕ

Изучение совместных эффектов и после-действий в кадре возможных севооборотов в орошаемом районе хардт.

II. — Участлчные результаты полученные на купьтуре люцерны.

Р. СПЕКТИ.

экспериментальные мероприятия проведенные в Ангольсхейме в 1966-м году секцией Экспериментационно-Информационного Отдела (S. E. J.) И. Н. Р. А. в Кольмаре, должны позволить изучение взаимодействий и сопровождающего действия вызванных различными оптациями, перед которыми бывают поставлены местные хозяйства. Выбор касается главным образом севооборотов и орошения. Но, до публикации общих результатов изучения этой проблемы, необходимо было проанализировать результаты полученные на каждой отдельной

культуре. Данные опытов с люцерной, представленные в этой работе, дополняют уже опубликованные данные относящиеся к культуре кукурузы на зерно.

Полученные результаты показали настоятельную необходимость орошения зерновой кукурузы, и в виду этого, улучшения питания этого растения, например, при пощи введения в севооборот культуры люцерны. А теперь становится ясным, что эту культуру нельзя продолжать более двух лет, и советуется орошать ее исключительно между 2-м и 3-м укосами.

Références bibliographiques

MARTY J. R., FIORAMONTI S., 1970. Comparaison de diverses rotations sur sol limoneux mal structuré ; effet améliorant des cultures fourragères. *Ann. agron.* **21** (3), 269-280.

MARTY J. B., HILAIRE A., 1972. Les arrière-effets. Comment raisonner les techniques culturales en tenant compte des précédents culturaux et de l'irrigation. *Entrep. agric.* **39**, 54-58.

MÉRIAUX Suzanne, 1971. Arrière-effet de l'irrigation sur le premier cycle de deux graminées fourragères (*Dactylis glomerata L., Festuca pratensis L.*). *Ann. agron.* **22** (1), 95-111.

SPECTY R., 1975. Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. I. — Résultats partiels sur cultures de maïs grain. *Ann. agron.* **26** (2), 169-197.

Ann. agron., 1978, **29** (1), 107-110.

Chronique des livres

LANGE O. L., KAPPEN L., SCHULZE E. D. — *Water and plant life — Problems and modern approaches.* Ecological studies, vol. 19 ; Springer-Verlag, Berlin, 536 p., 1976.

Dans la collection « Ecological Studies » quatre volumes relatifs aux relations eau-sol-plante sont déjà parus : physique du sol et des solutions dans les écosystèmes (vol. 4 : Ed. Hadas *et al.*), problèmes écologiques et physiologiques des plantes en milieu salin (vol. 15 : Ed. Poljakoff-Mayber et Gale), irrigation des zones semi-arides (vol. 5 : Ed. Yaron *et al.*), méthodes d'étude des relations eau-plante (vol. 9 : Ed. Slavik). Ce nouvel ouvrage se propose de compléter la collection en traitant de l'importance de l'eau pour la vie des plantes du niveau moléculaire dans le cytoplasme à la plante entière ou à l'écosystème.

Le texte est divisé en sept parties précédées chacune par une courte introduction qui donne un bref résumé des articles et montre leur liaison et leur intégration dans l'étude générale. Dans la partie 1 (relations de base eau-plante) une attention particulière est portée aux états de l'eau dans les tissus végétaux et dans le continuum sol-plante-atmosphère. L'étude de la consommation d'eau en fonction de l'humidité du sol est abordée dans la partie 2 ; le rôle des racines est souligné et un article est consacré au cas des céréales. A côté d'une présentation classique de la transpiration, c'est surtout sa régulation qui est étudiée dans la partie 3 : perméabilité des membranes cuticulaires, processus biochimiques conduisant aux mouvements stomatiques... Les relations entre stress hydrique et activité métabolique des plantes sont discutées dans la partie 4 en faisant intervenir les aspects structuraux, biochimiques et hormonaux. La partie 5 traite des différences de comportement des plantes vis-à-vis des facteurs hydriques (efficience de l'eau, adaptation...) selon leur type de fixation du gaz carbonique. Les parties 6 et 7 présentent des études de productivité ou de répartition géographique des espèces en fonction du facteur eau.

Cet ouvrage englobe donc des travaux d'échelles très différentes et peut donc donner l'impression d'un certain manque de liaison entre les diverses parties. Associé aux autres ouvrages de cette collection, il apporte des approches intéressantes, particulièrement dans les aspects biochimiques des relations eau-plante.

R. B.

MARCELLE R. — *Environmental and biological control of photosynthesis. Proceedings of a conference held at the « Limburgs Universitair Centrum »*, Diepenbeek, Belgique, 26-30 août 1974. Ed. W. Junk Publishers, The Hague, 406 p., 1975.

Ce livre réunit les interventions faites à la conférence qui s'est tenue au Centre Universitaire de Limburg, Diepenbeek (Belgique) en août 1974. Il s'agit de travaux de spécialistes de la photosynthèse, travaillant en général sur des plantes entières cultivées en conditions bien définies. Cependant les travaux sur la photochimie et la biochimie enzymatique ne sont pas exclus.

Dans une première partie (correspondant aux 3/4 du volume) les articles traitent :

— de la photosynthèse et de la photorespiration à l'échelle des feuilles ;
— du bilan de carbone à l'échelle des plantes ;
— des réactions biochimiques de photosynthèse et de respiration ;
tout ceci en fonction des facteurs externes (température, teneur en CO_2, intensité et composition de la lumière, durée du jour, manque d'eau, ...) ;
— des relations entre assimilation du CO_2 et stades de développement des plantes (floraison, vieillissement, plantules au stade juvénile) ainsi que de l'effet des substances de croissance sur l'assimilation ;
— enfin du transport des assimilats dans les plantes.

La fin du volume comprend une seconde série d'articles traitant plus spécialement du métabolisme crassulacéen : synthèse du malate, glycolyse, régulation des différentes voies de photosynthèse et rythmes de fonctionnement chez les Crassulacées.

Cet ouvrage présente donc un panorama relativement complet des travaux récents sur la physiologie de la photosynthèse. Ainsi, il peut intéresser tous ceux qui se préoccupent de production végétale.

L. C.

COOPER J. P. — *Photosynthesis and productivity in different environments*. International Biological Programme 3, Cambridge University Press, Cambridge, 715 p., 1975.

Ce volume est fondé sur les publications principales et les discussions du congrès d'Aberystwyth (Grande Bretagne, 1973) qui était un meeting de synthèse du Programme Biologique International sur le fonctionnement des systèmes photosynthétiques dans différents environnements.

Les deux premières parties comparent les productions photosynthétiques de différents écosystèmes :

— productivité primaire des écosystèmes terrestres : forêts, pâturages, toundra, déserts ;

— productivité primaire des écosystèmes aquatiques : macrophytes et microphytes d'eau douce et marine.

Puis les bases morphologiques et physiologiques permettant d'analyser les différences de production primaire sont examinées :

— distribution de l'énergie et du CO_2 en fonction de la structure et de la stratification des communautés ;

— activité photosynthétique des plantes supérieures, des tissus végétaux, des mousses et des lichens ;

— utilisation des assimilats pour la maintenance, la croissance et le développement.

L'influence des différents stress sur la photosynthèse et l'emploi des assimilats est étudié dans les cas de stress hydriques ou thermiques et de modifications de l'alimentation minérale.

La dernière partie traite du contrôle de la productivité photosynthétique dans les écosystèmes terrestres et aquatiques en introduisant aussi la notion de productivité potentielle en fonction du climat.

Cet ouvrage, qui ne prétend pas faire une synthèse complète dans cet important domaine, groupe cependant de très nombreuses données et apporte des comparaisons intéressantes entre les différents écosystèmes.

R. B.

LES BOCAGES : HISTOIRE, ÉCOLOGIE, ÉCONOMIE

Comptes rendus de la table ronde C.N.R.S. :

« Aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides ».

Les 5, 6 et 7 juillet 1976, le Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.), l'Institut National de la Recherche agronomique (I.N.R.A.) et l'Université de Rennes, ont organisé à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (E.N.S.A.R.) un colloque international consacré à l'étude des caractéristiques des bocages de différents pays : Allemagne, Belgique, Danemark, France, Grande-Bretagne, etc.

Une dizaine de rapporteurs ont fait la synthèse de soixante-dix communications scientifiques et des connaissances acquises sur les milieux bocagers. Ils ont notamment analysé les résultats des recherches entreprises depuis 1970 en Bretagne, à la suite des opérations d'arasement des haies et des talus dont les conséquences ont éventuellement été envisagées.

Les textes des rapports de synthèse et des communications, avec leurs résumés anglais, sont publiés intégralement par l'I.N.R.A. dans un volume de 590 pages. Les thèmes étudiés et les responsables des rapports de synthèse sont les suivants :

— *Géographie des bocages* : M. Flatres P., Université de Haute-Bretagne, Institut de Géographie, Rennes.

— *Caractérisation physique des bocages* :

- Bioclimatologie : M. Damagnez J., I.N.R.A., Station de Bioclimatologie, Avignon.
- Pédologie-Hydrologie : M. Ruellan A., I.N.R.A., Laboratoire de Science du Sol, Rennes.

— *Caractérisation botanique et Ecophysiologie végétale* :

● Caractérisation botanique des haies et des talus : M. Touffet J., Université de Rennes, Laboratoire d'Ecologie végétale.

● Ecophysiologie des plantes cultivées : M. Barloy J., I.N.R.A., Laboratoire de Phytotechnie, E.N.S.A. de Rennes.

— *Caractérisation zoologique — Ecologie animale* :

M. Lefeuvre J. Cl., Université de Rennes, Laboratoire de Zoologie.
MM. Missonnier J., Robert Y., I.N.R.A., Laboratoire de Zoologie, E.N.S.A. de Rennes.

— *Méthodologie d'étude des écosystèmes bocagers* :

● Télédétection : M. Goillot Ch., I.N.R.A., Laboratoire de Télédétection, I.N.A. Paris.

● Etudes de terrain : MM. Missonnier J., Robert Y., I.N.R.A., Laboratoire de Zoologie, E.N.S.A. de Rennes. — M. Rodolphe F., I.N.R.A., Laboratoire de Biométrie, Jouy-en-Josas.

— *Caractérisation économique et socio-économique* : M. Brown G., I.N.R.A., Station d'Economie rurale, E.N.S.A. de Rennes.

Cet ouvrage d'un prix unitaire de 160 F (envoi franco) peut être commandé à : I.N.R.A., Laboratoire de Zoologie, E.N.S.A., 65, rue de St-Brieuc, 35042 Rennes Cedex, Tél. (99) 59.04.68 et 59.02.40.

KOZLOWSKI T. T., ed. *Water deficits and plant growth*, New York, Academic Press, vol. IV, 1976, 383 p.

Ce volume est le quatrième et le dernier de la série éditée par T. T. Kozlowski du Département Forêts de l'Université de Madison (U.S.A.) et dont le premier volume est sorti en 1968. Il s agit en fait d'un traité assez général des relations plante-eau. Le présent volume se présente à la fois comme un complément aux précédents et une mise à jour pour certains aspects déjà abordés.

Le présent volume comprend 8 chapitres : méthodes de mesures de l'humidité et de l'état de l'eau des sols ; structure et fonctionnement des stomates ; la résistance stomatique et le contrôle des échanges gazeux ; déficits hydriques et photosynthèse ; alimentation en eau et chute des feuilles ; déficits hydriques et écoulement du latex ; déficits hydriques et fixation de l'azote par les nodules des racines ; amélioration des plantes et résistance à la sècheresse.

Sans entrer dans les détails, disons qu'on retrouve ici les avantages et les inconvénients d'un livre dont les diverses parties sont traitées par des auteurs différents. Par ailleurs, les chapitres concernant les relations du déficit hydrique et de la chute des feuilles, de l'écoulement du latex et de la fixation de l'azote constituent certainement la partie la plus originale de cet ouvrage. Les deux chapitres sur les stomates et celui de Boyer sur le déficit et la photosynthèse paraissent de bonnes mises au point.

On est donc en présence d'un livre fort utile qui constitue un bon instrument de travail pour tous ceux qui s'intéressent à ces aspects de la physiologie végétale.

DUCHAUFOUR Ph. — *Pédologie*. I. — *Pédogenèse et classification*. Paris, Masson, 1977, 477 p.

Cet ouvrage est le premier d'un ensemble de deux volumes destinés à remplacer l'ancien « Précis de Pédologie » maintenant épuisé. Il a pour objet l'étude de la pédogenèse et de la classification des sols. Le second volume concernera les constituants et les propriétés du sol et paraîtra ultérieurement.

L'ouvrage est divisé en deux parties.

La première partie traite des processus physico-chimiques de la pédogenèse et regroupe 4 chapitres consacrés à l'évolution de la fraction minérale, à la dynamique de la matière organique, aux transports de matière dans le sol, à la genèse et à l'évolution des sols.

La deuxième partie traite de la pédogenèse, base de la classification des sols et regroupe 9 chapitres consacrés à la systématique des sols, aux sols peu évolués et sols à profil peu différencié, aux sols calcimagnésiques, aux sols isohumiques et aux vertisols, aux sols brunifiés, podzoliques, hydromorphes, riches en sesquioxydes et aux sols salins.

ODUM E. P. — *Ecologie*. Traduction de R. Bergeron. Les éditions HRW (Montréal), Doin éd. (Paris), 1976, 254 p.

Le livre Ecologie de E. P. Odum, professeur à l'Université de Géorgie (USA) et traduit par R. Bergeron, professeur de biologie, a pour sous-titre « un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines ». L'auteur indique par là quel est le contenu de ce livre. Il ne s'agit pas de l'écologie au sens étroit, c'est-à-dire d'une branche de la biologie traitant des relations entre les organismes et leur environnement. C'est comme le précise bien l'auteur dans sa préface, de l'écologie en tant que disci-

pline d'intégration qui fait le lien entre les sciences physiques, les sciences biologiques et les sciences humaines qu'il est question. C'est ce qui fait le grand intérêt de ce petit livre présentant une information synthétique et défendant une philosophie pour une meilleure association entre l'homme et la nature.

La présentation du livre repose sur deux idées maîtresses : le principe des niveaux d'organisation, le fait que l'homme fait partie intégrante des systèmes écologiques. Il n'y a donc pas de chapitre spécial l'homme et la nature parce qu'il en est question tout au long du livre. Les différents chapitres sont les suivants : l'écosystème, les flux d'énergie à l'intérieur de l'écosystème, les cycles biogéochimiques et les concepts limitants, l'écologie des populations (formes de croissance, compétitions, prédations, parasitisme), développement et évolution de l'écosystème, les principaux écosystèmes du monde (mers, estuaires et rivages marins, rivières fleuves, lacs et étangs, les déserts, les toundras, les prairies, les forêts). Le dernier chapitre traite de problèmes capitaux pour aujourd'hui et pour demain : ressources, pollution, bionomie et gestion de l'écosystème. L'auteur tente de bien faire comprendre son idée force (p. 225) : « Les plus grosses pierres d'achoppement à la planification régionale et à la gestion de l'écosystème sont (1) la fragmentation du mécanisme de prise de décision en deux fractions, l'une professionnelle, l'autre politique et (2) le fait qu'il est extrêmement difficile de déterminer quelle est la « capacité limite » d'une région pour l'homme ou encore le niveau optimum de densité de la population et de développement industriel. »

Une bibliographie de langue anglaise accompagne chaque chapitre. Cependant à la fin du livre on trouvera un grand nombre de références françaises. La traduction, mis à part quelques détails, est remarquable. Il faut le signaler, car elle a dû coûter beaucoup d'efforts au traducteur, la pensée du Professeur Odum, riche, nuancée, s'exprimant par des phrases souvent longues et difficiles à suivre.

Ce livre a le mérite de placer l'écologie à son véritable niveau dans la société d'aujourd'hui. Sa clarté, la profondeur de ses vues, la généralité des problèmes abordés en font un manuel d'étude facilement accessible et qui devrait être lu par tous ceux qui, de proche ou de loin, s'intéressent à l'environnement.

P. C.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 7-1978

Dépôt légal : 3e trimestre 1978. N° d'impression : 25538

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1978	France	Étranger	Le N°
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOLOGIE-ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	85 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	300 F	330 F	65 F
ANNALES D'HYDROBIOLOGIE (2)			

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

(2) Les *Annales d'Hydrobiologie* cessent de paraître à partir de 1978.

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 64 F — Étranger sauf R. F. A. : 75 F
— Le numéro : France : 21 F — Étranger sauf R. F. A. : 27 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **52,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **35,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **150,00 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **150,00 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **85,00 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **58,85 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **120,00 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition INRA-CNRS.
549 p., 1973 ..... **160,50 F**

Recherches acridiennes à Madagascar.
262 p., 1972 ..... **80,00 F**

IVe Conférence du groupe international d'étude des virus et des maladies à virus de la vigne, Colmar 16-18 juin 1970.
211 p., 1972 ..... **60,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1978, **29** (1).

Table des matières

G. VACHAUD, C. DANCETTE, S. SONKO, J. L. THONY. — Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination du bilan hydrique 1

G. CALLOT, H. CHAMAYOU, M. DUPUIS. — Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relation avec la dynamique de l'eau. Eléments d'analyse d'un système carbonaté 37

A. BAILLE, R. GUICHERD, Marie MERMIER. — Le pyranomètre sélectif : étude de ses possibilités d'utilisation dans le domaine agronomique et dans celui de la pollution atmosphérique... 59

G. LACAZEDIEU, Ph. MALAURENT. — Mesure de l'évapotranspiration. Méthode et critiques... 79

R. SPECTY. — Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. II. — Résultats partiels sur cultures de luzerne 89

Chronique des livres 107

Contents

G. VACHAUD, C. DANCETTE, S. SONKO, J. L. THONY. — Field determination of the hydraulic characteristics of an unsaturated soil. Application on two typical soils of Republic of Senegal with an example to the calculation of the water balance..... 1

G. CALLOT, H. CHAMAYOU, M. DUPUIS. — Variations of the pH in the solution of calcareous material as related to water dynamics. Data for the analysis of a carbonate system..... 37

A. BAILLE, R. GUICHERD, Marie MERMIER. — Study of possibility to use a selective pyranometer in agronomy and atmospheric pollution..... 59

G. LACAZEDIEU, Ph. MALAURENT. — Measurement of evapotranspiration. Method and reviews 79

R. SPECTY. — Study of the accumulative effects and after effects of several agronomical factors applied within the framework of rotations possible in the irrigated Hardt region. II. — Incomplete results on lucern crops..... 89

Book reviews 107

Les Annales Agronomiques figurent dans Current Contents

I. N. 8-036001-5

annales agronomiques

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 2

inra

AAG
29.2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron. ANAGA9 29 (2) 111-210 (1978)

FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : R. FÉVRIER

Directeur général adjoint : J. POLY

Inspecteurs généraux : R. BOUCHET, P. BOUVAREL, C. CALET, A. CAUDERON, G. FAUCONNEAU, G. JOLIVET, R. PÉRO.

Rédaction des Annales

Pour l'ensemble des Séries : J. POLY

Annales agronomiques.

— J. CHAUSSIDON, Chef du Département de Science du sol, C. N. R. A.
— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— M. HALLAIRE, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— J. PONCHET, Chef du Département de Pathologie végétale, 06602 Antibes.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie,

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès. Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales d'Hydrobiologie.

— J. LECOMTE, Chef du Département d'Hydrobiologie, C. N. R. A.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie. Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (2), 111-122.

Oscillations journalières de la profondeur des nappes en l'absence de précipitations ([1])

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE * et F. A. DAUDET **

Service hydrologique, O.R.S.T.O.M.,
19, *rue Eugène-Carrière*
75018 *Paris*

* *Département de Bioclimatologie,*
Centre de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

** *Station de Bioclimatologie,*
Centre de Recherches agronomiques des Antilles, Domaine Duclos
97170 *Petit Bourg (Guadeloupe)*

Résumé

L'oscillation diurne de la profondeur de la nappe (fig. 1), observable en l'absence de précipitation est responsable de la variation journalière du débit des sources et des rivières.

L'amplitude de cette oscillation est d'autant plus grande que la nappe est proche de la surface, que l'enracinement de la végétation est profond et l'évapotranspiration potentielle élevée ; elle atteint fréquemment plusieurs cm et peut exceptionnellement dépasser 15 cm.

Sachant que le phénomène peut se produire en l'absence de circulation latérale (fig. 2), on a cherché une explication qui ne tienne compte que des flux et de la variation du potentiel selon la direction verticale.

Imaginant que les conditions d'équilibre sont à peu près réalisées en fin de nuit, les profils de potentiels matriciels au dessus de la nappe peuvent être alors représentés par des droites de pente unité (profils ψ_0 et ψ_1, fig. 5), le vecteur translation $\psi_0 - \psi_1$ étant lié à la quantité d'eau cédée par le sol au cours du cycle $t_0 - t_1$. Quant aux profils intermédiaires, de jour (ψ_j), et de nuit (ψ_n), on peut les situer par rapport aux précédents en tenant compte de l'évolution journalière de la profondeur de la nappe (Z_N) et du sens du flux (per ascensum le jour, per descensum la nuit).

En première analyse, ces profils semblent indiquer que la quantité d'eau cédée par le sol, pendant tout ou partie de la phase diurne (profils $\psi_0 \rightarrow \psi_j$) est très supérieure à la quantité d'eau cédée au cours du cycle (profils $\psi_0 \rightarrow \psi_1$). Pour lever cette contradiction, il faut admettre que le potentiel efficace, ψ_e responsable des flux verticaux, peut prendre des valeurs inférieures à $\psi(\theta)$ (valeur de ψ déterminée en fonction de l'humidité θ en condition d'équilibre) lorsque le sol est soumis au dessèchement.

Cette étude confirmerait donc la notion de potentiel efficace introduite antérieurement sur la base du schéma de circulation de l'eau indiqué figure 6.

Du point de vue méthodologique, le phénomène étudié ici a des conséquences évidentes. On notera également que l'amplitude de l'oscillation indique dans quelle mesure la nappe contribue à l'alimentation hydrique de la végétation.

Les fluctuations journalières du débit des rivières ont été notées dans la plupart des régions du monde.

En en recherchant l'origine, on a pu vérifier (Mugge, 1954; Ronsch, 1965) qu'elles correspondaient à des oscillations de période journalière du débit au niveau même de

([1]) Extrait de la Thèse de Docteur-Ingénieur de J. Callède soutenue le 30 juin 1977, à l'Université de Paris VI.

la source, lorsque celle-ci est alimentée par une nappe de faible profondeur, que la végétation surmontant la nappe est profondément enracinée et, lorsqu'on se trouve par ailleurs en période sèche. Quelques auteurs enfin (Callède, 1977 ; Jaworski, 1968 ; Troxell, 1936 ; Tschinkel, 1963 ; Ubell, 1959 ; Voronin, 1973 ; White, 1932) ont étudié l'oscillation diurne de la nappe, oscillation observable dans les conditions précitées et responsable de la variation systématique du débit constatée à la source.

Nous limitant ici à l'oscillation de la nappe souterraine, nous décrirons le phénomène, indiquerons et critiquerons diverses explications fournies antérieurement et proposerons enfin une interprétation nouvelle fondée sur les processus de circulation de l'eau dans la frange capillaire.

I. — Description du phénomène

L'enregistrement piézométrique reporté figure 1 est un exemple parmi beaucoup d'autres, illustrant l'oscillation diurne de la nappe.

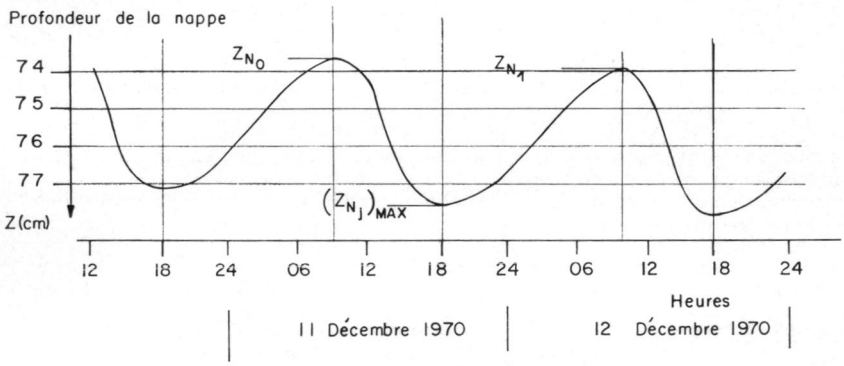


FIG. 1. — *Oscillation journalière de la nappe*
(observation de J. C. Olivry, Cameroun, les 11 et 12.12.70).

Diurnal oscillation of the water table.

Si l'on repère deux profondeurs successives Z_{N0} et Z_{N1} de la nappe à son point le plus haut, à 24 h d'intervalle, on note une baisse générale du niveau ($Z_{N1} - Z_{N0}$) de l'ordre ici de 0,3 cm par jour. Mais, à cette variation d'échelle saisonnière, se superpose une oscillation nycthémérale dont l'amplitude atteint ici 3,5 cm ; ainsi, l'abaissement de la nappe au cours d'une fraction de la journée ($Z_{Nj} - Z_{N0}$) est plus de dix fois supérieur à l'abaissement journalier.

On notera également sur l'exemple illustré par la figure 1 que la nappe est à son niveau le plus haut vers 9 h, le plus bas vers 18 h.

Une confirmation du phénomène peut être donnée par l'écoulement des lysimètres après un apport d'eau excédentaire, en début de journée.

On constate en effet (fig. 2) que si le drainage s'arrête en fin de matinée (temps t_2, fig. 2), témoignant ainsi de l'abaissement de la nappe au dessous de l'exutoire, il reprend très généralement dans la soirée (temps t_3, fig. 2) témoignant alors du rehaussement de la nappe. Une telle observation réalisée en case et en l'absence par consé-

quent de flux latéraux, indique que dans l'explication de l'oscillation diurne, il n'y a lieu de prendre en considération que les flux verticaux.

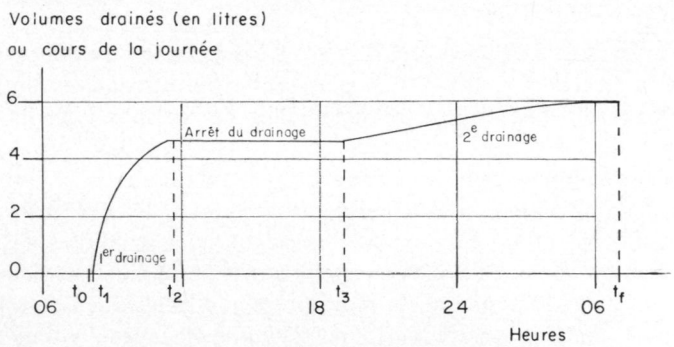


FIG. 2. — *Somme des quantités d'eau écoulées d'un évapotranspiromètre après une irrigation appliquée au temps* t_0.

Water volumes flowing from an evapotranspirometer after an irrigation applied at the time t_0.

Revenant aux enregistrements piézométriques dont la figure 1 ne donnait qu'un exemple, on notera que la phase, caractérisée figure 1 par les deux heures de la journée 9 h et 18 h se retrouve à 1 heure près dans la quasi totalité des cas, du moins en région tropicale où la durée du jour reste toujours voisine de 12 heures. Le rapport de l'amplitude à la baisse moyenne journalière peut souvent atteindre 10 comme il apparaît figure 1. Quant à l'amplitude, elle est susceptible de varier de 0 à quelque 15, exceptionnellement 20 cm. Avoisinant 0 en période pluvieuse, l'amplitude de l'oscillation observée en l'absence de précipitation apparaît d'autant plus importante :

— que la nappe est proche de la surface ;

— que le développement racinaire est plus important. Ainsi, dans des conditions par ailleurs sensiblement identiques (même sol sableux, nappe à 80 cm de profondeur) Jaworksi, en Pologne, a pu noter une amplitude de 2 cm sous prairie, 3 cm sous pomme de terre, 16 cm sous peuplier ;

— que le rayonnement et par corollaire, l'amplitude de température, le déficit de saturation en milieu de journée, les gradients de température, le déficit de saturation en milieu de journée, les gradients de température dans le sol et l'évapotranspiration potentielle sont élevés.

II. — Etude critique des explications antérieures

Pour mémoire, indiquons tout d'abord que si l'on a évoqué parfois certains facteurs autres que la température et l'évapotranspiration, qui présentent des variations cycliques systématiques de périodicité journalière (pression atmosphérique, marées terrestres, parfois vent) leur action n'a finalement pu être retenue.

Il en est de même de la dilatation des puits supportant les limnigraphes, sous l'effet des variations de température.

En fait l'abaissement de la nappe durant la journée est la conséquence évidente de l'évapotranspiration et de la succion radiculaire qu'elle provoque dans la frange capillaire. Ce qui reste à expliquer, c'est pourquoi et comment la nappe se relève en l'absence de tout apport extérieur.

On se limitera à mentionner les deux explications données respectivement par Ubell et Olivry.

Le schéma explicatif d'Ubell (1959) revient à supposer l'existence d'un flux de vapeur selon la direction verticale, flux qui résulterait du gradient de température dans le sol et pourrait conduire à la réalimentation de la nappe à partir des réserves sus-jacentes.

Cette interprétation ne semble pas pouvoir être retenue :

Même en tenant compte du flux liquide provoqué par les gradients de température (thermodiffusion) et qui s'ajoute au flux vapeur, les gradients de température observés au-delà de quelques décimètres sont bien trop faibles pour pouvoir provoquer des remontées de la nappe aussi importantes que celles que l'on a pu observer.

D'autre part, ce flux *per descensum* étant d'origine étrangère au flux *per ascensum* qui provoque l'abaissement de la nappe, on ne comprendrait pas pourquoi la nappe remonte dans tous les cas d'une hauteur à peu près équivalente à son abaissement.

Le schéma d'Olivry (fig. 3) consiste à faire intervenir deux flux liquides : le flux *per ascensum* provoqué par la succion radiculaire (lequel tend à abaisser la nappe) et le flux latéral dirigé vers la rivière ou la source, lequel tend à rehausser la nappe et est d'autant plus important que celle-ci s'est abaissée sous l'effet de la succion. Dès lors, les oscillations constatées résulteraient d'une variation systématique, avec changement de signe, de la différence des deux flux.

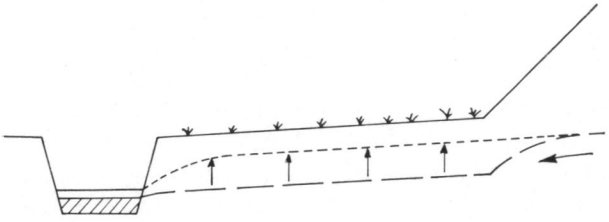


FIG. 3. — *Profils de la nappe en travers de la rivière.*
Profiles of the water table across the river.

Ce schéma ne peut être lui non plus retenu, ne serait-ce que parce qu'il ne peut s'appliquer aux cases lysimétriques où l'on retrouve cependant le même battement de la nappe, comme le montre la figure 2. Si les flux latéraux peuvent perturber l'oscillation diurne, ils n'en sont pas la cause ; aussi n'en tiendrons-nous pas compte dans l'explication proposée ci-après.

III. — Le schéma explicatif proposé

Pour la raison indiquée ci-dessus, l'explication proposée ici exclura les transferts latéraux tels que ceux résultant d'un drainage oblique, et s'appuiera sur les profils et les flux examinés uniquement sur la verticale du lieu considéré.

a) *L'évolution journalière des profils de potentiel matriciel*

Nous porterons l'attention sur l'évolution journalière des profils de potentiel matriciel ψ en fonction de la profondeur z.

Notant que la profondeur de la nappe Z_N est celle où le potentiel est nul, on peut par le raisonnement, imaginer la forme du profil dans les horizons sus-jacents à différents moments du nycthémère.

Considérons d'abord les *moments où la nappe est au plus haut* (profondeurs Z_{N0} et Z_{N1}, fig. 1) c'est-à-dire vers le début de la matinée ; admettons que, suite au rééquilibrage qui s'est fait durant la nuit, les profils traduisent alors un état proche de l'équilibre, c'est-à-dire l'absence de flux. Cet état correspond à un potentiel total

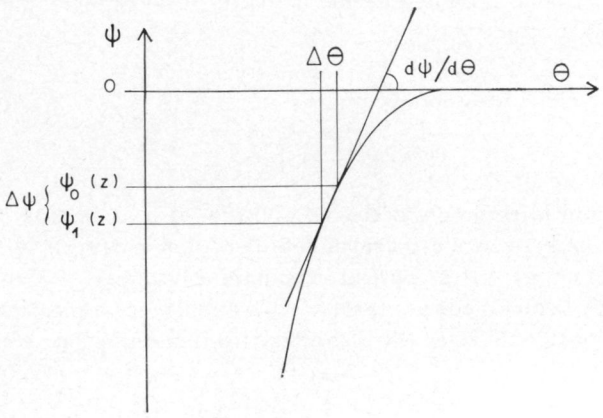


FIG. 4. — *Relation* $\psi(\theta)$.

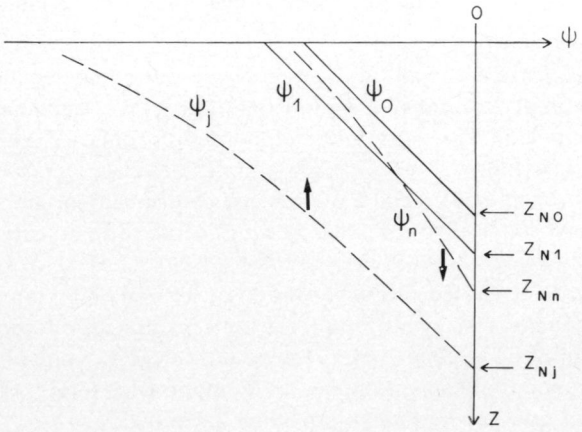


FIG. 5. — *Evolution journalière des profils de potentiel matriciels* :

ψ_0 et ψ_1 : profils successifs d'équilibre,
ψ_j et ψ_n : profils intermédiaires correspondant aux phases jour (ψ_j) et nuit (ψ_n) (les flèches indiquen : le sens du transfert).

Diurnal evolution of the profiles of matrix potential :

ψ_0 and ψ_1 : successive profiles of equilibrium,
ψ_j and ψ_n : intermediary profiles which are corresponding to the daytime (ψ_j) and the night (ψ_n) (the arrows indicate the direction of the transfer).

(ψ — Z) constant à tous les niveaux ; ainsi, au-dessus de la nappe où $\psi = 0$, les profils $\psi(Z)$ seront représentés par les droites de pente unité indiquées figure 5 (profil $\psi_0(Z)$ au temps t_0 quand la nappe est à la profondeur Z_{N0} et profil $\psi_1(Z)$ au temps $t_1 = t_0 + 1$ jour, quand la nappe est à la profondeur Z_{N1}).

On notera que le vecteur translation $\Delta\psi$ qui fait passer de $\psi_0(Z)$ à $\psi_1(Z)$ est égal à l'abaissement journalier moyen de la nappe $Z_{N0} - Z_{N1}$ (soit 0,3 cm dans le cas représenté figure 1).

Compte tenu de la relation caractéristique du sol, existant entre le potentiel matriciel ψ et l'humidité volumique θ (fig. 4), on peut relier à la variation $\Delta\psi$ ainsi constatée une variation d'humidité $\Delta\theta$.

A un niveau donné Z où le potentiel matriciel varie systématiquement :

de la valeur $\psi_0(Z) = Z - Z_{N0}$

à la valeur $\psi_1(Z) = \psi_0(Z) + \Delta\psi = Z - Z_{N1}$,

la variation d'humidité sera donnée par

$$\Delta\theta = \Delta\psi \left(\frac{d\psi}{d\theta}\right)^{-1} \tag{1}$$

$d\psi/d\theta$ représentant la pente de la courbe $\psi(\theta)$ (fig. 4) à l'intérieur de la gamme de variation $\psi_0, \psi_1 = \psi_0 + \Delta\psi$ du potentiel considéré (pente qui sur les gammes $\Delta\psi$ de 1 voire quelques cm peut être considérée comme constante).

Ainsi le stock d'eau Q cédé par le sol (c'est-à-dire l'évapotranspiration en l'absence de tout autre apport) peut être relié au vecteur translation $\Delta\psi$ par :

$$Q = ETR = \int_{Z_N}^{0} \Delta\psi \left(\frac{d\psi}{d\theta}\right)^{-1} dZ\,. \tag{2}$$

Cherchons maintenant à situer les profils intermédiaires de milieu de journée et de nuit.

De jour : *l'expérience* montrait (fig. 1) que de jour, et en particulier en fin d'après midi, la profondeur de la nappe atteignait une valeur Z_{Nj} nettement supérieure à Z_{N0} ou Z_{N1}. Cette profondeur nous donne un point du profil $\psi_j(Z)$ recherché, le point ($\psi = 0$; $Z = Z_{Nj}$) (fig. 5).

Mais le *raisonnement* nous incite à penser que contrairement au cas précédent, la pente du profil sera supérieure à l'unité puisque la succion radiculaire crée un flux *per ascensum*.

Ainsi est-on amené au tracé d'un profil $\psi_j(Z)$ tel que celui représenté figure 5, entièrement « à gauche » du profil $\psi_1(Z)$: à toute profondeur le potentiel ψ atteint des valeurs plus faibles que celles observées en fin de cycle. Ce profil exprime entre autres choses que, si l'abaissement diurne de la nappe ($Z_{Nj} - Z_{N0}$) est par exemple dix fois plus grand que l'abaissement journalier moyen ($Z_{N1} - Z_{N0}$), l'abaissement diurne de potentiel $\psi_0 - \psi_j$ à toute profondeur Z sera plus que dix fois supérieur à l'abaissement moyen journalier de potentiel $\Delta\psi = \psi_0 - \psi_1$. Ainsi, l'application de la formule (2) indiquerait une perte en eau du sol durant la phase diurne plus de dix fois supérieure à la perte en eau sur l'ensemble du nycthémère ; nous reviendrons plus loin sur ce résultat contradictoire.

De nuit : *L'expérience* montrait (fig. 1) que la nappe remonte tout le long de la nuit pour atteindre la profondeur Z_{N1} le matin suivant. Retenons une profondeur Z_{Nn}

intermédiaire entre Z_{Nj} et Z_{N1} et portons sur le graphique de la figure 5 le point ($\psi = 0$, $Z = Z_{Nn}$) comme point de départ d'un profil nocturne $\psi_n(Z)$.

Si l'on suppose que les transferts ont alors lieu de haut en bas, comme le laisse supposer la remontée de la nappe, il faut admettre que la pente est inférieure à l'unité ce qui conduit à un tracé tel que celui représenté par ψ_n (fig. 5).

L'évolution des profils intermédiaires (ψ_j et ψ_n) entre les deux profils d'équilibre (ψ_0 et ψ_1) laisse apparaître une contradiction que nous avons déjà relevée et qu'il convient de lever.

La *contradiction* est la suivante : Si les quantités d'eau cédées ou gagnées par le sol sont bien reliées aux variations de potentiel $\Delta\psi$ par la formule (2), il faut admettre que la perte en eau Q sur l'ensemble du nycthémère (profils $\psi_0 - \psi_j$) résulte :

— d'une perte égale à NQ (avec $N > 10$) durant la phase diurne (profils $\psi_0 - \psi_j$),

— puis d'un gain égal à (N — 1) Q durant la nuit (profils $\psi_j - \psi_1$).

La disparition puis la réapparition de cette quantité d'eau (N — 1) Q en l'absence de tout apport extérieur ne peuvent être retenues comme plausibles.

b) *Signification des potentiels matriciels en phase diurne*

Pour *lever la contradiction*, il faut admettre que les transpirations élevées en phase diurne et les succions qu'elles développent alors au niveau racinaire sont capables de créer de façon quasi instantanée un état de tension de l'eau dans le sol et que dans ces conditions, le potentiel ψ peut atteindre des valeurs inférieures (supérieures en valeur absolue) à la valeur $\psi(\theta)$ définie en conditions d'équilibre. S'il en est bien ainsi, la variation de potentiel observée à un niveau ne traduirait pas forcément une variation concomitante de l'humidité et en particulier l'accroissement systématique de ψ du jour à la nuit (profils ψ_j et ψ_n, fig. 5) ne signifie pas que l'humidité augmente à tout niveau.

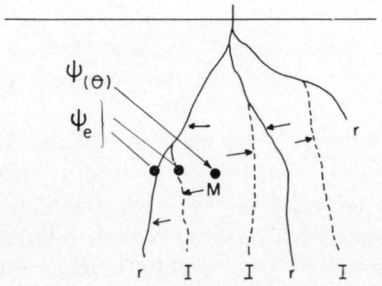


FIG. 6. — *Schéma supposé de la circulation de l'eau dans les sols en voie de dessèchement, montrant* :

- les voies de circulation macroscopique de l'eau (r : racine ; I : itinéraires privilégiés dans le sol) ;
- les flux par microdiffusion (flèches) correspondant au dessèchement du sol et conduisant à un potentiel efficace ψ_e (en I et r) plus faible que $\psi(\theta)$.

Hypothetical scheme of the transfer of water in drying soil showing :

- macroscopical transfer paths of the water (r : roots ; I : privilegied paths in soil),
- microscopical flows (arrows) which cause the drying of the soil and lead to an effective potential (near I and r) lower than $\psi(\theta)$.

Un schéma proposé antérieurement (Hallaire, 1963) et que nous rappellerons brièvement en fournit une explication : admettons que le débit macroscopique selon la verticale ait lieu selon des itinéraires privilégiés qui sont les racines d'une part (voies r, fig. 6) mais également l'ensemble des points du sol de moindre résistance (voies I, fig. 6) ; tenons compte en outre de la microdiffusion qui a pour effet d'alimenter à tout niveau ces itinéraires (I et r) et simultanément de provoquer le dessèchement des mailles délimitées par les voies I et r ; on peut alors écrire que le potentiel, dit efficace, ψ_e au niveau de I ou r est égal au potentiel matriciel $\psi(\theta)$ au cœur des mailles (point M, fig. 6) corrigé d'un terme qui exprime la chute de potentiel liée à la microdiffusion ; enfin, si l'on admet en première approximation qu'il y a proportionalité entre ce terme correctif et la variation de teneur en eau $d\theta/dt$ (négative dans le cas du dessèchement) on aboutit à la formule :

$$\psi_e = \psi(\theta) + K\, d\theta/dt\,. \qquad (3)$$

Selon ce schéma, et comme le fait apparaître la formule (3), le potentiel efficace ψ_e se confondrait avec $\psi(\theta)$ lorsque l'équilibre est réalisé ($d\theta/dt = 0$). Cela signifie que les profils d'équilibre $\psi_0(Z)$ et $\psi_1(Z)$ représentés figure 5 exprimeraient réellement la variation de $\psi(\theta)$ et que l'écart entre les deux profils serait bien lié à la quantité d'eau cédée par le sol sur l'ensemble de la période (0 — 1) comme l'indique l'équation (2).

En phase diurne, par contre, lorsque la transpiration provoque le dessèchement du sol ($d\theta/dt < 0$), le potentiel efficace ψ_e prendrait des valeurs inférieures à $\psi(\theta)$, l'écart étant d'autant plus important que la vitesse de dessèchement ($-d\theta/dt$) est plus grande ; ainsi l'abaissement important de ψ constaté de jour puis l'accroissement de même ordre durant la nuit résultent :

— non pas d'un abaissement puis d'un accroissement de l'humidité,
— mais d'un accroissement, puis d'une diminution de la vitesse de dessèchement.

L'application de la formule (2) pour évaluer l'évolution du stock d'eau dans le sol conduirait ici à des résultats profondément erronés.

Ainsi, globalement et en première approximation, le schéma de circulation de l'eau dans le sol en voie de dessèchement (fig. 6) et la notion de potentiel efficace qui en découle rendent bien compte de l'évolution journalière des profils de potentiels supposés ($\psi_0 \rightarrow \psi_j$ et $\psi_j \rightarrow \psi_n$, fig.5) et corrélativement de la variation de la profondeur à laquelle le potentiel est nul c'est-à-dire de la profondeur de la nappe.

On soulignera enfin que la chute de potentiel au-dessous de la valeur $\psi(\theta)$ sous l'effet du dessèchement du sol a été vérifiée expérimentalement par la technique de mesure micropsychrométrique dans les conditions de laboratoire (Rhaiem, 1972) et au champ (Daudet et Valancogne, 1977). Le potentiel efficace introduit primitivement pour rendre compte des transferts observés à l'échelle macroscopique et considéré à nouveau dans le cas présent pour interpréter les variations de profondeur de nappe, correspond donc bien au potentiel directement mesurable *in situ*.

c) *Discussion*

Si l'explication fournie ci-dessus rend compte de façon à peu près satisfaisante des faits rapportés par l'expérience, il reste à expliquer un décalage systématique entre l'oscillation de la nappe et la variation journalière de l'ETR. En effet, si le taux de

dessèchement du sol (— $d\theta/dt$) demeurait proportionnel, à tout niveau, à l'ETR instantanée et si d'autre part, le potentiel efficace était donné de façon rigoureuse par l'équation (3), la nappe devrait atteindre son niveau supérieur, non pas à 9 h, mais en début de nuit et y demeurer jusqu'au lever du jour ; de même elle atteindrait son niveau inférieur non pas à 18 h mais vers 14 h.

Pour expliquer cette réponse différée de la nappe aux variations de l'ETR, on peut noter entre autres choses :

— que le taux de dessèchement du sol (— $d\theta/dt$) est forcément déphasé par rapport à l'ETR en raison de la mobilisation du stock d'eau contenu dans le végétal, stock qui diminue en début de journée pour réaugmenter le soir et durant la nuit ;

— que la capacité en eau c des itinéraires (I ou r) n'est pas forcément négligeable vis-à-vis de la capacité C des mailles. Dans ces conditions, la réalisation du gradient de potentiel, selon MI (gradient de potentiel nécessaire pour assurer le taux de dessèchement voulu au cœur des mailles), implique la perte d'une certaine quantité d'eau au niveau de c ; il en résultera un certain délai avant que le potentiel efficace en I ou en r atteigne la valeur voulue pour assurer au cœur même de la maille le transfert correspondant à $\theta d/dt$.

Nous soulignerons à cet égard la distinction qui s'impose entre :

— le modèle supposé de circulation de l'eau (fig. 6) qui suffit pour expliquer qualitativement qu'en phase de dessèchement ($d\theta/dt < 0$), les potentiels qui régissent en fait les transferts verticaux sont inférieurs à $\psi(\theta)$,

— et l'expression, approximative et discutable, de ce potentiel, telle qu'elle est donnée par l'équation (3).

Il convient également de remarquer que la lente évolution de la nappe (et par conséquent, de l'ensemble du profil $\psi(Z)$) durant toute la nuit et le début de la matinée indique que l'équilibre n'est jamais tout à fait atteint. Ainsi les profils ψ_0 et ψ_1 introduits figure 5 comme points de départ de notre raisonnement doivent-ils être considérés en fait, non comme les profils réels de fin de nuit, mais simplement comme l'expression d'un équilibre vers lequel tend le profil de potentiel durant la nuit.

Conclusions

En conclusion de cette étude, on soulignera tout d'abord les erreurs grossières que l'on peut commettre lorsque l'on cherche à évaluer à partir de mesures instantanées, un débit moyen journalier. Cette remarque s'applique aussi bien au débit d'une rivière ou d'une source, que d'un puits peu profond, d'un réseau de drainage, d'un lysimètre ou d'un évapotranspiromètre.

De même, une mesure instantanée journalière du potentiel, sur un tensiomètre par exemple, risque de ne fournir qu'une indication très inexacte de l'évolution du potentiel hydrique d'un jour à l'autre.

Sur un plan plus fondamental, l'évolution journalière des profils de potentiels (que l'on est obligé d'admettre si l'on veut tenir compte de la variation journalière de la profondeur de la nappe et du sens des flux), confirme l'hypothèse avancée antérieurement que, dans un sol soumis au dessèchement, le potentiel efficace ψ_e, responsable des transferts macroscopiques, peut être très inférieur au potentiel $\psi(\theta)$

défini en fonction de l'humidité moyenne θ de la couche considérée. A défaut d'une explication plus élaborée, le modèle proposé antérieurement et qui revient à distinguer (fig. 6) les micro et les macrotransferts conduit à une interprétation satisfaisante.

Si l'oscillation journalière du niveau de la nappe ou du potentiel à un niveau donné peut être la source d'erreurs dont il convient de s'affranchir, par contre cette oscillation est susceptible de fournir des informations précieuses. En particulier, la possibilité d'alimentation hydrique d'un couvert végétal à partir de la nappe serait importante à connaître mais il est extrêmement difficile de l'apprécier. Il est intéressant de noter que l'oscillation diurne indiquée constitue pour le moins un indice des remontées capillaires à la frange racinaire.

Mais il y a lieu de souligner que l'investigation suggérée ici peut concerner des échelles d'espace très différentes :

Dans une parcelle comportant une collection d'espèces diversifiées (arboretum par exemple), *l'oscillation diurne de la profondeur* de la nappe doit pouvoir renseigner sur les facultés de la végétation, située à proximité immédiate du puits de mesure, à prélever l'eau de la nappe. Par contre, cette même faculté devra être rattachée à un couvert d'une certaine étendue si la mesure porte sur *l'amplitude diurne du débit* relevé à l'exutoire d'un réseau de drainage ou au niveau d'une source.

A l'échelle du laboratoire enfin, sur colonnes de sol et dans le cadre d'études touchant à la physiologie de la croissance des racines ou à la sélection des plantes, le battement d'une nappe à une (ou des) profondeur(s) donnée(s), sous l'effet d'une brusque variation de transpiration, peut constituer éventuellement un intéressant moyen de contrôle.

Reçu pour publication en mai 1978.

Summary

Diurnal oscillations of the water table level during dry periods

The diurnal oscillation of the water table level (fig. 1) which occurs during dry periods, is the cause of the diurnal variation of the flow of the springs and the rivers.

The amplitude of this oscillation increases when the water table is closer to the surface, when the roots are deeper and when the potential evapotranspiration is higher ; it often reaches some cm and exceptionally exceeds 15 cm.

As this phenomenon occurs even when there is no lateral movement (fig. 2), the explanation which we have looked for, only takes into account the vertical flow and vertical potential gradients.

If equilibrium is approximatively reached at the end of the night, then the matrix potential profiles above the water table are straight lines, the slope of which is unity (see ψ_0 and ψ_1, fig. 5), the translation vector $\psi_0 - \psi_1$ being related to the water losses of the soil during the whole period ($t_0 - t_1$). It is possible to draw approximatively the intermediary profiles $\psi_j(z)$ and $\psi_n(z)$, knowing the diurnal variation of the water table level (where $\psi = 0$) and the direction of the transfer (per ascensum during the day time, per descensum during the night).

In a first analysis, these profiles appear to indicate that the water losses of the soil during the diurnal phase ($\psi_0 - \psi_j$) are more important than the losses during the whole period ($\psi_0 - \psi_1$).

This contradiction is explained if we assume that the effective potential (the variation of which determines vertical transfer) may reach lower values than $\psi(\theta)$ (the value which is given as a function of water content θ under equilibrium conditions) when the soil is undergoing drying. So this study confirms the notion of the effective potential which had previously been introduced on the bases of the transfer model shown in figure 6.

The methodological consequences of this phenomenon are evident. On the other hand, we note that the amplitude of the diurnal oscillation indicates how important is the contribution of the water table in the water consumptive use of the canopy.

Zusammenfassung

Tagesschwankungen des Grundwasserstands in Ermangelung von Niederschlägen

Die in Ermangelung von Niederschlägen beobachtete Tagesschwankung des Grundwasserstands (Abb 1) verursacht die tägliche Variation der Abflussmenge der Quellen und Flüsse.

Die Weite dieser Schwankung ist um so grösser als der Grundwasserspiegel der Oberfläche nahe liegt, als die Bewurzelung der Vegetation tief und die potentielle Evapotranspiration hoch sind ; sie erzielt oft mehrere Zentimeter und kann ausnahmsweise 15 Zentimeter übertreffen.

Da wir wissen, dass die Erscheinung ohne seitlichen Umlauf entstehen kann (Abb 2), wurde eine Erklärung gesucht, die nur Wasserflüsse und Potentialänderung gemäss der vertikalen Richtung berücksichtigt.

Wenn man annehmem darf, dass die Gleichgewichtsbedingungen am Ende der Nacht beinahe zustande gebracht sind, können die Profile des Matrixpotentials oberhalb des Grundwasserspiegels mit Geraden mit Einheitsgefälle, (ψ_0 und ψ_1 Profile Abb 5) wiedergegeben sein, sein, da der Verschiebungsvektor $\psi_0 - \psi_1$ mit der vom Boden abgegebenen Wassermenge während des $t_0 - t_1$ Zyklus verbunden ist. Die Zwischenprofile bei Tage (ψ_j) und nachts (ψ_n) können gegenüber den vorhergehenden angenommen werden under Berücksichtigung der täglichen Evolution des Grundwasserstands (Z_n) und der Wasserflussrichtung (per ascensum bei Tage und per descensum nachts).

In erster Analyse scheinen diese Profile darauf hinzuweisen, dass die von Boden abgegebenen Wassermenge während der ganzen Tagesphase oder eines Teils davon ($\psi_0 \rightarrow \psi_\alpha$) Profile sehr viel höher ist als die während des Zyklus abgegebene Wassermenge ($\psi_0 \rightarrow \psi_1$ Profile). Um diesen Widerspruch zu beseitigen, muss man annehmen, dass das für die vertikalen Wasserflüsse verantwortliche wirksame Potential ψ_e Werte erreichen, kann die niedriger als $\psi(\theta)$ liegen (ein Wert von ψ, der im Hinblick auf die Feuchtigkeit unter Gleichgewichtsbedingungen bestimmt wird), wenn der Boden der Entwässerung unterworfen ist.

Diese Untersuchung würde also den Begriff des wirksamen Potentials bestätigen, der aufgrund des auf Abb 6 vorgestellten Wasserumlaufsplans vorher eingeführt worden ist.

Die hier untersuchte Erscheinung hat eindeutige Auswirkungen auf die Methodologie. Es ist auch bemerkenswert, dass die Schwankungsweite anzeigt, in welchem Umfang der Grundwasserspiegel zu der Wasserbesorgung der Vegetation beiträgt.

РЕЗЮМЕ

Суточные колебания уровня подземных вод в отсутствии дождевых осадков.

Ж. КАЛЛЕД, М. ХАЛЛЕР, Ф. А. ДОДЕ.

Дневные колебания глубины уровня подземных вод (Рис. 1), наблюдающиеся в отсутствии дождевых осадков ответственны за суточные изменения водного режима источников и рек.

Амплитуда этих колебаний зависит от близости уровня подземных вод к поверхности глубины укоренения растительности и величины потенциальной эвапотранспирации ; она часто достигает нескольких сантиметров и, в исключительных случаях, может превысить 15 см.

Зная, что явление это может происходить при отутствии бокового движения, была сделана попытка об'яснить его с принятием во внимание потоков и изменений потенциалов толькоьв вертикальном направлении.

Если предположить что к концу ночи достигаются приблизительно равновесные условия, профили матричных потенциалов над водной скатертью можно изобразить прямыми склона единицы (профили ψ_0 и ψ_1, рис. 5), причем вектор поступательного движения $\psi_0 - \psi_1$ будет связан с количеством влаги отданной почвой в течении цикла $t_0 - t_1$. Что-же касается промежуточных профилей, дневных (ψ_j) и ночных (ψ_n), они могут быть определены по отношению к пред'идущим, принимая во внимание суточную эволюцию глубины уровня (Z_N) и направления потока (восходящий - днем, нисходящий - ночью).

Поверхностный анализ этих профилей как будто указывает, что количество влаги отданной почвой в течении части, или целой дневной фазы (профили $\psi_0 - \psi_j$) значительно превышает количество отданное в течении полного цикла (профили $\psi_0 - \psi_1$). Чтобы об'яснить это противоречие необходимо допустить что эффективный потенциал ψ_e, ответственный за вертикальные потоки может быть меньше величины $\psi_{(\theta)}$ (величина ψ, определенная я

зависимости от влажности θ в равновесном состоянии) в случаях, когда почва подвержена высыханию.

Данная работа подтверждаеткак-будто понятие эффективного потенциала, введенного раньше, на основе схемы движения воды, указанной на рис. 6.

С точки зрения методологической, изучаемое явление имеет явные последствия. Необходимо также отметить что амплитуда колебаний указывает степень участия подземных водв водном питании растений.

Références bibliographiques

CALLÈDE J., 1977. *Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations*, Thèse de Docteur-ingénieur, Paris VI, 141 p.

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement, *Ann. agron.*, **14** (4), 393-428.

JAWORSKI J., 1968. Evapotranspiration of plants and fluctuations of the ground water table. *AISH, Symposium de Wageningen*, Vol. II, n° 83, 730-39.

MUGGE R., 1954. Aufzeichnung von luftdruck und erdbebenwellen mit hilfe von brunnen-spiegeln. *AISH, Assemblée générale de Rome*, Vol. II, n° 37, 49-52.

OLIVRY J. C., 1970. *Variations journalières de débit des rivières Bamiléké en période de tarissement. Saison sèche* 69-70. *Mesures et interprétation*. ORSTOM. Yaoundé.

RHAIEM H., 1972. Mesures comparées du potentiel matriciel de l'eau dans le sol en cours de dessèchement et à l'équilibre ; vérification de l'existence d'un potentiel efficace. *C. R. Acad. Sci.*, **274,** 3194-3196.

RONSCH H., 1965. Tagesgänge im Abfluss und deren meteorologische Ursachen. *Z. Meteorol.*, Band 20, Heft 11/12, 364-371.

TROXELL H. C., 1936. The diurnal fluctuation in the ground-water and flow of the Santa Ana River and its meaning. *Transactions American Geophysical Union*, **17,** 496-504.

TSCHINKEL H. M., 1963. Short-term fluctuation in stream flow as related to evaporation and transpiration. *J. Geol. Res.*, **68** (24), 6459-6469.

UBELL K., 1959, Moisture movement in unsatured (three phases) soils with special regard to the utilisation of lysimeter observations. *AISH, Symposium de Hannoversch-Munden*, Vol. II, n° 49, 153-65.

VALANCOGNE Ch. et DAUDET F. A., 1977. Etude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier. *Ann. agron.*, **28** (2), 137-157.

VORONIN N. A., 1973. Ground water regime in the sands of arid regions. *Pochvovedenie*, n° 5, 82-92.

WHITE W. N., 1932. A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plans an d evaporation from soil. *US Geological Survey*. Water-supply Paper, 659 A. Washington.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 123-131.

Porosité de la craie
Appréciation de la taille et de la répartition des pores

J. L. BALLIF

avec la collaboration technique de Ch. HERRE

Station de Science du Sol, I.N.R.A.,
51000 *Châlons-sur-Marne*

Résumé

La craie sénonienne est constituée d'un assemblage rigide de débris de nannofossiles, entre lesquels sont installés des pores à géométrie fixe. La porosité totale de la craie en place varie de 41 à 51 p. 100 entre 100 et 150 cm de profondeur. La porosité de fissures serait de l'ordre de 3 à 10 p. 100, puisque dans un morceau de craie la porosité totale, ouverte avec l'extérieur, varie de 36 à 44 p. 100.

L'eau est fortement retenue dans la craie. Des pressions élevées, supérieures au pF 3,5, sont nécessaires pour l'extraire. L'application de la loi de Jurin aux résultats d'extraction d'eau, par désorption, permet d'apprécier la taille et la répartition des pores : les pores ont 0,3 à 3 microns de diamètre, répartis dans une gamme réduite. Cette description doit être prise avec la réserve due non seulement aux phénomènes d'hystérésis, mais également à la présence de constrictions et à l'assimilation des espaces poraux à un réseau de capillaires.

La craie, par sa porosité, est un grand réservoir pour stocker l'eau. Cet important volume d'eau (57 p. 100 en période de sécheresse) resterait en partie disponible pour les plantes à enracinement profond.

Introduction

La craie du Sénonien inférieur (Santonien-Coniacien) est la roche unique sur laquelle sont formés les sols de la Champagne. Les propriétés de ces sols résultent pour une très large part de celles de la craie et de l'ensemble des matériaux dérivés : pierres, cailloux, graviers et éléments fins.

A l'examen microscopique, on constate que la craie est constituée par une accumulation de nannofossiles, entiers ou brisés, et entre ces fossiles existent des vides plus ou moins importants. Au point de vue agronomique, ces vides présentent donc un intérêt particulier pour la réserve en eau du sol.

Dans un premier stade d'investigations, il est apparu nécessaire d'entreprendre l'étude de la porosité d'un tel matériau, régulateur de la réserve hydrique des sols Champenois. Cette étude a été conduite en effectuant des mesures de porosité sur la craie en place d'une part, et sur des échantillons au laboratoire d'autre part. De plus, il a été effectué des extractions de l'eau sous des pressions croissantes, afin de formuler des hypothèses sur la répartition des pores en fonction de leur diamètre. Enfin, les données recueillies sont exploitées pour apprécier la réserve en eau de la craie.

1. — Conditions des mesures

1.1. — *Origine des matériaux étudiés*

Les mesures ont été effectuées sur des coupes de sols situés aux environs de Chalons-sur-Marne et concernant la craie du Sénonien inférieur, sous-étages Santonien et Coniacien.

Le profil type du secteur est une rendzine brune caractérisée par la présence, au-dessous de l'horizon Ap, de poches de cryoturbation, reposant sur de la craie remaniée également par cryoturbation et faisant transition avec la roche-mère crayeuse en place (Dutil et Ballif, 1968). Cette craie n'apparaît que vers 90 à 120 cm de profondeur; elle présente généralement une fissuration importante (litage) et, très souvent des plans de diaclases (tectonique).

1.2. — *Méthodes de mesures*

Le volume apparent de la craie en place est mesuré à l'aide d'un voluménomètre à membrane dans les horizons de craie entre 80 et 150 cm de profondeur.

Le volume apparent d'échantillon de craie, de 2 cm de section et de 3 cm de long, est mesuré par immersion dans le mercure à l'aide d'un voluménomètre. Celui d'échantillons de sections plus grandes (5/4 cm) est mesuré par immersion dans l'eau dans une éprouvette, les échantillons étant au préalable saturés d'eau sous vide.

Le volume réel de la craie broyée en poudre est mesuré à l'aide du pycnomètre à eau ou à l'aide du pycnomètre à air. Avec cet appareil sur des morceaux de craie (3-4/1,5-2 cm), le volume « pseudo-réel » ou « l'ensemble du volume réel et du volume des pores fermés » (Gras, 1969) est également déterminé.

Les courbes de pF des échantillons de craie sont réalisées à l'aide d'extracteurs à plaques et à membranes poreuses (appareils de Richards). Les morceaux de craie taillés sont de 40 mm de section sur 15 à 20 mm d'épaisseur. La durée d'humectation et celle de l'extraction sont de 24 h.

Pour cette extraction, la difficulté est d'assurer la continuité des films d'eau entre le morceau de craie taillé et le support poreux. Trois supports sont utilisés : un sable fin quartzeux, puis de la craie et du sol broyés. La composition granulométrique de ces matériaux est la suivante : le sable fin est essentiellement constitué de particules comprises entre 200 et 50 μ, avec un pourcentage de 99 p. 100 ; la craie et le sol broyés contiennent 60 p. 100 d'éléments inférieurs à 20 μ ; sur le sol la matière organique a été détruite.

Dans la manipulation avec le sable fin comme support, l'eau ne sort pas des morceaux de craie. Avec la craie et le sol broyés l'eau sort ; les quantités d'eau extraites sont comparables.

2. — Résultats des mesures

2.1. — *Porosité totale de la craie en place* (tableau 1)

Avec les données de volume apparent mesuré sur place (moyennes de quatre à six répétitions) et celles de volume réel, les densités apparente (da), réelle (dr) et la porosité totale (Pt) de la craie en place sont calculées.

$$Pt \text{ (p. 100 volume apparent)} = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) 100.$$

Les densités apparente et réelle sont respectivement de 1,33 à 1,62 et de 2,68 à 2,71. Dans la craie la porosité totale varie de 41 à 51 p. 100. Dans la craie remaniée, au-dessous des poches de cryoturbation, la porosité totale est plus grande, 51 à 55 p. 100.

TABLEAU 1

Porosité totale et ouverte de la craie

Open and total porosity of the chalk

Emplacements	Profondeur en cm	Craie		
		en place	échantillons	
		Porosité cm³ p. 100		
		totale	totale	ouverte
Sénonien inférieur :				
Tournant du Puits.....	90-100 *	52,2		
	140-150	50,8	42,5	42,5
Mont Pourpoint.....	80-120 *	43,4	40,1	40,6
	120-160	42,3	39,9	39,2
Burtasse	100-120	40,7	39,5	39,1
Coniacien :				
Mont du Mesnil	100-110 *	51,6		
	120-130	48,7	37,4	36,9
	130-150		43,9	40,1
Finet de Sarry	90-100 *	55,0		
	130-150	46,2	41,1	41,8
St-Jean-s/Moivre	120-130	47,8	36,9	
Santonien				
La Petite Plane	140-150		39,0	38,6

* Craie remaniée par cryoturbation.

2.2. — *Porosité totale d'échantillons de craie : Porosité ouverte*

Les mesures de volumes réel et pseudo-réel servent à déterminer les densités réelle (dr) et pseudo-réelle (dr'). En principe une diminution de la densité pseudo-réelle par rapport à la densité réelle d'un échantillon de craie indiquerait l'existence de pores fermés.

a) *Porosité accessible à l'air.*

Les valeurs de densité pseudo-réelle sont comparables à celles de densité réelle. Il n'existe donc pratiquement pas de pores fermés dans la craie. *Le volume des pores est donc ouvert avec l'extérieur.*

La porosité de morceaux de craie varie de 37 à 44 p. 100. *Cette porosité est une porosité ouverte* (P_0)

$$P_0 \text{ (p. 100 volume apparent)} = \left(1 - \frac{da}{dr'}\right) 100.$$

b) *Porosité accessible à l'eau.*

Sur des échantillons de craie, la porosité totale accessible à l'eau est déterminée de la manière suivante : les morceaux de craie, saturés sous vide pendant 36 h avec de l'eau dégazée, ont été pesés, puis, après passage à l'étuve à 105 °C, de nouveau pesés jusqu'à poids constant. Sur ces mêmes échantillons les densités apparente et réelle ont été déterminées.

La valeur moyenne du volume d'eau remplissant la porosité totale de la craie est de 41,8 $cm^3/100\ cm^3$. Ce volume équivaut à celui de la porosité totale 41,1 $cm^3/100\ cm^3$ (tabl. 1). Cette valeur correspond à celles obtenues par d'autres auteurs (Coin, 1946 ; Gras et Monnier, 1962).

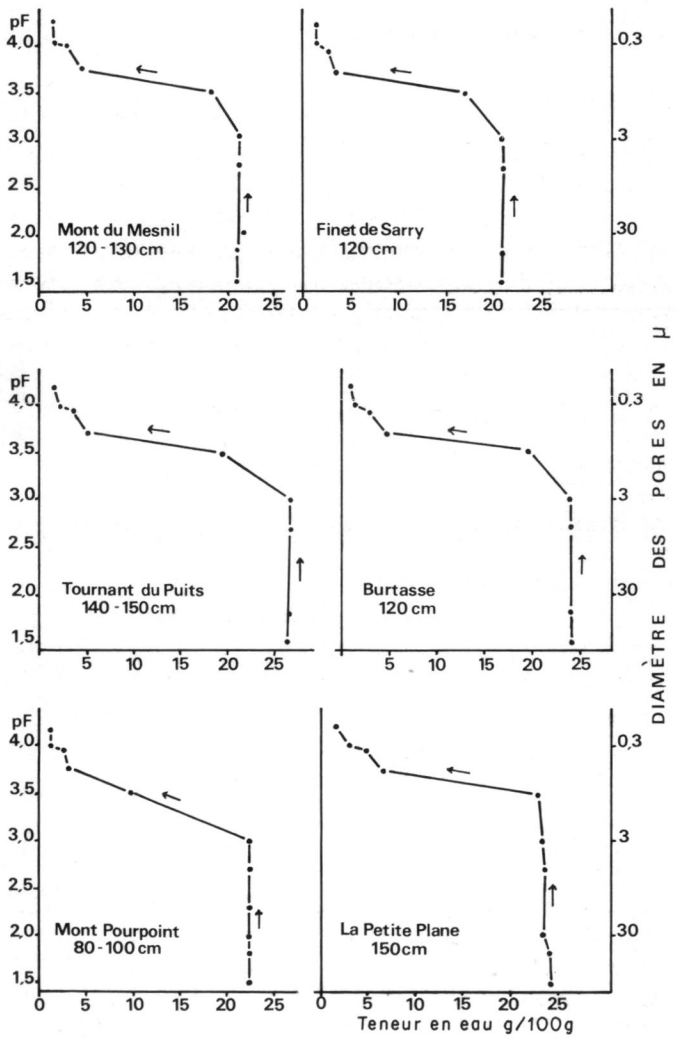


FIG. 1. — *Courbes de* pF *et courbes des diamètres des pores de la craie sénonienne.*
Wilting point curves and pore-size curves of the Senonian chalk.

L'ensemble du réseau de pores de la craie est accessible à l'air et à l'eau. Ce réseau de pores est donc en communication avec l'extérieur.

2.3. — *Extraction de l'eau* (fig. 1)

L'eau contenue dans la craie est extraite à des pressions croissantes. Dans les conditions d'extraction de l'eau définies ci-dessus (paragraphe 1-2), on constate que jusqu'à une pression de 1 000 g/cm² (pF = 3) l'eau ne sort pas de la craie ; sa teneur en eau est alors de 21 à 26 p. 100 selon l'origine de l'échantillon. Puis la plus grande partie de l'eau est extraite entre les pressions de 3 000 et 9 000 g/cm² (pF = 3,5 et 3,95). A la pression de 16 000 g/cm², toute l'eau de la craie est pratiquement extraite, il ne reste plus que 1,2 à 1,7 p. 100 d'eau.

La pression ou la succion nécessaire pour extraire l'eau de la craie est importante. *Le potentiel capillaire de la craie est donc élevé.*

3. — Conséquences de l'organisation de la porosité de la craie sur le régime de l'eau

3.1. — *Porosité fissurale*

La craie en place est une roche litée et fissurée. Lors des mesures de densité *in situ*, le volume de roche concerné intéresse donc un matériau formé de plusieurs éléments de roches séparés par des fissures. La porosité de la craie en place est de 41 à 51 p. 100 entre 100 et 150 cm de profondeur. Par contre, la porosité totale de fragments de craie, mesurée au laboratoire, est plus faible : 37 à 44 p. 100. Ces valeurs se rapprochent de celles déjà trouvées par les géologues (Mégnien, 1960). *Il existerait donc une porosité de fissures de la craie de l'ordre de 3 à 10 p.* 100 (valeurs obtenues par la différence des mesures).

3.2. — *Distribution des dimensions des pores de la craie* (fig. 1 et 2)

3.21. *Appréciation de la dimension des pores.*

La dimension des pores de la craie peut être appréciée en utilisant les résultats des mesures du potentiel capillaire par l'extraction de l'eau sous pression. Pour chaque pression, le rayon des pores supposés circulaires peut être ainsi déterminé en utilisant la loi de Jurin, relative au mouvement de l'eau dans les tubes capillaires.

En phase de dessèchement, le rayon r des pores est donc calculé à l'aide de la formule suivante :

$$r = \frac{2\,Ts.\cos\alpha}{\rho.p}$$

Ts = tension superficielle de l'eau : 75 dynes/cm.
Cos α = 1, mouillabilité complète.
ρ = poids spécifique de l'eau = 1.
p = pression g/cm².

Dans les conditions des mesures décrites au paragraphe précédent (1-2), on constate que la porosité des échantillons de craie sénonienne prélevés entre 100 et 150 cm de profondeur est essentiellement formée de pores de 0,34 à 3 μ de diamètre. Le

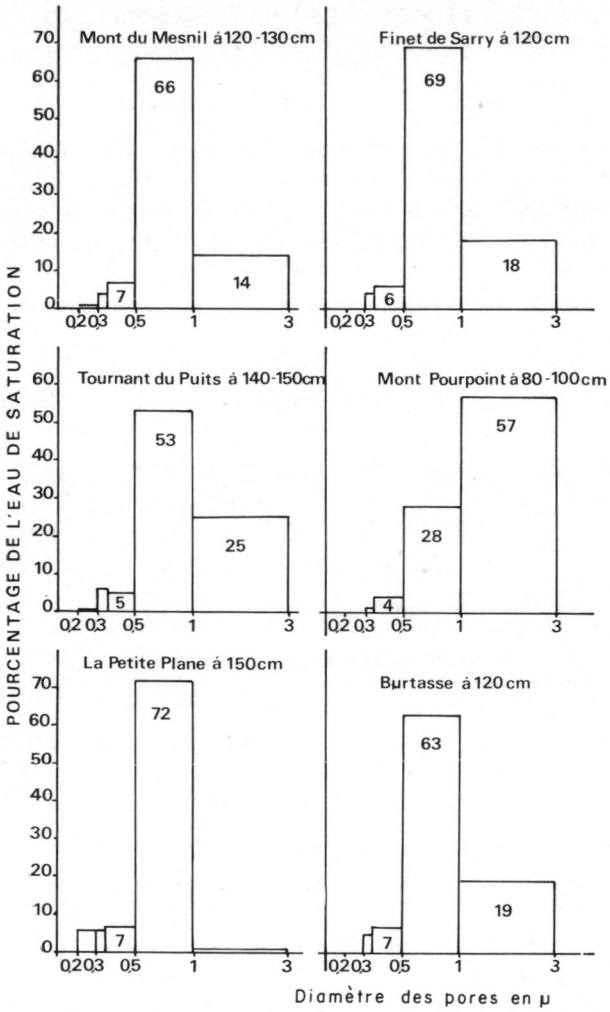


FIG. 2. — *Distribution de la taille des pores de la craie sénonienne.*
Pore-size distribution of the senonian Chalk.

diamètre moyen des pores est de 1,2 µ. Un échantillon de craie du Santonien, « La petite plane », présente une courbe de diamètre des pores différente : les diamètres des pores sont répartis entre 0,34 et 1,0 µ.

Les craies du Santonien et du Coniacien n'auraient donc pas la même répartition de tailles des pores. Ceci peut être rapproché des observations au microscope électronique à balayage : la craie du Santonien présente une microstructure alvéolaire et irrégulière, la craie du Coniacien possède une microstructure orientée (Manivit, 1975).

3.22. *Répartition de la taille des pores.*

Le pourcentage de l'eau extraite entre chaque pression, par rapport à la quantité totale d'eau contenue dans l'échantillon de craie, est utilisé pour connaître la distri-

bution des dimensions des pores. Cette estimation, obtenue par désorption d'un liquide mouillant dans un matériau rigide, demande une certaine réserve, à cause des phénomènes d'hystérésis et de l'irrégularité réelle des espaces poraux que l'on assimile à un réseau de capillaires communiquant entre eux.

En principe, la quantité d'eau extraite entre deux pressions successives est liée à un certain diamètre de pores.

L'examen des quantités d'eau extraite successivement, en fonction des pressions croissantes exercées, permet d'obtenir ainsi une appréciation de la répartition de la dimension des pores concernés.

Ce raisonnement suppose que les pores, de diamètres croissants, sont régulièrement accessibles en fonction des pressions croissantes exercées. Il se peut évidemment qu'il existe quelques constrictions ne permettant pas à l'eau située dans certaines cavités, de dimensions plus grandes, d'être extraite pour la pression correspondante à celle qui permet l'extraction dans les pores plus petits qui l'environnent ; c'est l'objection majeure que l'on peut faire à cette interprétation. Mais pour le moment, il paraît difficile d'étudier ce problème d'irrégularité de répartition des pores.

Sous cette réserve et d'après les résultats obtenus en désorption, la répartition de la taille des pores de la craie se situe dans une gamme réduite : 80 p. 100 du volume des vides correspondent à des diamètres de pores distribués entre 0,5 et 3 μ. Il n'y a pratiquement pas de pores à diamètre inférieur à 0,2 μ. Cette distribution de la taille des pores est comparable à celle de la craie sénonienne à Tancarville (Aubry et Lautridou, 1974) obtenue au porosimètre à mercure, où 75 p. 100 du volume des vides correspondent à des diamètres de pores distribués entre 0,8 et 2 μ.

3.3. — *La réserve en eau de la craie*

Dans un échantillon de craie, la capacité totale de rétention en eau après saturation sous vide est de 40,9 $cm^3/100\ cm^3$. La quasi-totalité de l'espace poral est remplie par l'eau. La craie est saturée à 96 p. 100 de sa porosité totale. Après l'humectation et la saturation apparente, sous la pression atmosphérique, des échantillons pour l'extraction, la rétention en eau est également élevée : 37,2 à 43,4 $cm^3/100\ cm^3$. Cette saturation est importante à cause de la présence de pores ouverts avec l'extérieur. Au pF 4,2, la rétention de l'eau est infime, de 1,7 à 2,4 $cm^3/100\ cm^3$, soit 5 p. 100 de la porosité totale de l'échantillon.

Lorsqu'un fragment de craie se trouve dans le sol en surface, l'eau contenue dans celui-ci peut donc contribuer à l'approvisionnement de la réserve en eau et à l'alimentation hydrique des plantes (Gras et Monnier, 1963).

Dans la craie en place pendant et à la fin de l'hiver, la craie à 130-150 cm de profondeur a une teneur en eau de 35,9 à 37,8 $cm^3/100\ cm^3$. La craie est donc saturée à 78 p. 100 de sa porosité totale. Au cours des périodes de sécheresse estivale cette saturation reste de l'ordre de 57 p. 100 (53 p. 100 en 1976 ; Ballif, 1977).

La réserve en eau de la craie est importante. Sur un échantillon de craie cette réserve varie de 91-102 à 5 p. 100, en volume. Sur la craie en place elle varie de 65-87 à 50-65 p. 100 de la porosité totale. La craie est donc un excellent réservoir pour stocker l'eau. Cet important volume d'eau est disponible pour les plantes à enracinement profond.

Conclusion

La description de la porosité de la craie cénonienne à Châlons/Marne peut se résumer ainsi :

Dans la craie en place, à 100-150 cm de profondeur, la porosité totale varie de 41 à 51 p. 100. *La porosité fissurale serait* de l'ordre de 3 à 10 p. 100.

Dans un morceau de craie, la porosité totale varie de 36 à 44 p. 100. *Cette porosité est ouverte avec l'extérieur*, accessible en totalité à l'air et à l'eau. La pression ou la succion nécessaire pour extraire l'eau contenue dans la craie est importante : toute l'eau est extraite entre les pF 3,5 et 3,95.

L'application de la loi de Jurin aux résultats des extractions d'eau par des pressions croissantes permet d'apprécier la dimension et la distribution de la taille des pores. La porosité est essentiellement formée de pores de 0,3 à 3 μ de diamètre. La répartition de la taille des pores se situe dans une gamme réduite : 80 p. 100 des vides ont un diamètre distribué entre 0,5 et 3 μ. Cette répartition serait différente selon la formation géologique : Coniacien ou Santonien.

Ces résultats, obtenus par désorption, doivent être pris avec une certaine réserve due aux phénomènes d'hystérésis, à l'assimilation des cavités intergranulaires à un réseau de capillaires et à la présence de constrictions. Mais ces mesures sont comparables à celles obtenues au porosimètre à mercure sur des craies sénoniennes de Normandie.

La craie sénonienne par sa porosité continue et à géométrie fixe, est un grand réservoir pour stocker l'eau. Cet important volume d'eau (85 p. 100 du volume total en période hivernale, 57 p. 100 en période de sécheresse) est disponible pour les plantes à enracinement profond. A la surface du sol, l'eau contenue dans les cailloux de craie contribue à l'alimentation hydrique des plantes.

La craie présente donc une capacité importante d'emmagasinement et une grande perméabilité. Cet aspect est important à retenir pour tout problème d'apport d'eau sur les sols de craie.

Reçu pour publication en mai 1978.

Summary

Chalk porosity
Estimation of the pore size and distribution

The Senonian chalk is made of fixed aggregation of nanofossil fragment between which fixed-geometry pores are located. The total porosity of the chalk varies between 41 and 51 p. 100 between 100 and 150 cm in depth. The porosity of cracks would reach 3 to 10 p. 100 as in a piece of chalk the total porosity open to the outside varies between 36 and 44 p. 100.

Water is strongly retained in chalk. High pressures (higher than pF 3,5) are necessary to extract it. The application of Jurin's law to the results of the extraction of water by desorption leads to the estimation of the pore size and distribution : the pores show a diameter of 0,3 to 3 μ and are distributed within a limited scale. This description should be considered with the reservation due not only to the hysteresis phenomena but also to the presence of constrictions and to the assimilation of the pore spaces to a capillary network.

With its porosity chalk constitutes a big reservoir to store water. This important water volume (57 p. 100 in dry period) would partially remain available for deep-rooted plants.

Zusammenfassung

Kreideporosität, Schätzung der Porengrösse und-verteilung

Die senonische Kreide besteht aus einer starren Zusammensetzung von Minifossilienresten, zwischen denen Poren mit unveränderlicher Geometrie eingesetzt sind. Die Gesamtporosität der vorhandenen Kreide schwankt zwischen 41 und 51 p. 100 bei einer Tiefe von 100 bis 150 cm Tiefe. Die Porosität der Spalte würde 3 bis 10 p. 100 ungefähr erreichen, da die aussen geöffnete Gesamtporosität in einem Kreidestück zwischen 36 und 44 p. 100 schwankt.

In der Kreide wird das Wasser stark zurückbehalten. Hohe Drucke, höhere als pF 3,5, sind notwendig, um es herauzsuziehen. Die Anwendung des Jurinschen Gestzes auf die Ergebnisse der Wasserextraktion durch Desorption führt zu einer Schätzung der Porengrösse und-verteilung : die Poren weisen einen Durchmesser von 0,3 bis 3 Mikrons auf und sind auf einem eingeschränkten Bereich verteilt. Diese Beschreibung muss mit Vorbehalt betrachtet werden auf grund der Hysteresiserscheinungen und auch der Anwesenheit von Zusammenschnürungen und der Angleichung der Porenraüme an ein Kapillarnetz.

Ihrer Porosität zufolge ist die Kreide eine grosse Wassersammelstelle. Dieses wichtige Wasservolumen (57 p. 100 in Dürreperiode) würde teilweise für die tiefeingewurzelten Pflanzen verfügbar bleiben.

РЕЗЮМЕ

Порозность мела.

Оценка размеров и распределения пор.

Ж. Л. БАЛЛИФ.

Мел Сенонийской эпохи представляет из себя затвердевшую смесь микроскопических ископаемых, разделенных порами постоянной геометрической формы. На глубине ото 100, до 150 см порозность мела на месте может изменяться от 41 р. 100 до 51 р. 100. Порозность трещин достигает от 3 р. 100, до 10 р. 100 и общая порозность куска мела открытого с наружной стороны изменяется от 36, до 44 р. 100.

Мел удерживает воду так хорощо, что для ее экстракции необходимы сильные давления (выше 3,5 pF).

Применение закона Юрина к результатам полученным при экстракции воды с помощью десорбции, позволяет оценить размеры и распределение пор. Диаметр плохо распределенных пор меняется от 0,3 до 3-х микронов. Но тут необходимо внести некоторые оговорки, касающиеся не только явлений гистерезиса, но также присутствия сужений и возможности приравнения пространств пор ккапилярной сети.

Мел, благодаря его порозности, является хорошим резервуаром влаги. Крупный об'ем воды (57 р. 100 в засушливый период) остается таким образом частично в распоряжении растений с глубоким укоренением.

Références bibliographiques

AUBRY M. P. et LAUTRIDOU J. P., 1974. Relations entre propriétés physiques, gélivité et caractères microstructuraux dans divers types de roches : craies, calcaires crayeux, calcaire sublithographique et silex. *Bull.* 19, *Centre de Géomorphologie du C. N. R. S. Caen.*

BALLIF J. L., 1972. Evolution annuelle de profils hydriques dans les sols de la Champagne crayeuse. *Travaux Stat. Sci. Sol, Publ.* 7.

BALLIF J. L., DURAND R., DUTIL P. et MULLER J., 1975. Résultats des études en cases lysimétriques. Campagnes 1973-74 et 1974-1975. *Travaux Stat. Sci. Sol, Publ.* 37.

BALLIF J. L., 1977. Effets de la sécheresse 1976 sur la réserve hydrique des sols de craie. Sous presse.

COIN L., 1946. Essai d'hydrogéologie comparée de la Champagne et de la Brie entre Arcis/Aube et Montmirail. *Bull. Serv. Carte Géol. Fr.*, XLVI, 220.

DUTIL P. et BALLIF J. L., 1968. Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. *Sci. Sol* (2), 79-91.

GRAS R., 1969. Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. *Sci. Sol*, 79-89.

GRAS R. et MONNIER G., 1963. Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. *Sci. Sol* (1), 1-8.

HÉNIN S., 1976. *Cours de physique du sol.* I. ORSTOM Paris.

MANIVIT H., 1975. Etude des nannofaciès in *Notice explicative de la carte géologique à* 1/50 000 *de Châlons/Marne*, nº 189, B. R. G. M.

MÉGNIEN Cl., 1960. Observations hydrogéologiques sur le Sud-Est du Bassin de Paris. Les circulations aquifères dans le Jurassique et le Crétacé de l'Yonne. Thèse Doctorat 3e cycle, Paris.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 133-145.

Utilisation d'un modèle de désalinisation en sol humide

J. SERVANT (*)

avec la collaboration technique de S. CONVENTI

Service d'Etude des Sols, I. N. R. A.,
Ecole nationale supérieure agronomique,
34060 *Montpellier*

Résumé

Le processus de salinisation ou de désalinisation d'une couche de sol, sous l'effet des irrigations et/ou de la pluviosité est examiné à l'aide d'un modèle théorique simple utilisable en sol humide saturé d'eau ou proche de la saturation. Les résultats obtenus concernent des essais au laboratoire, une expérience en lysimètre et un dispositif d'étude en terrain salé de Camargue. Au cours de ces expériences, la salinité est déterminée *in situ* par l'emploi de bougies poreuses et/ou de « salinity sensors ». La comparaison des courbes théoriques et expérimentales permet de tester la validité du modèle. Dans les conditions de l'expérience, celui-ci paraît assez fiable dans le cas d'une couche de sol soumise directement à l'impact des eaux d'irrigation ou de pluie.

Le lessivage des sels solubles, dans le sol, peut s'effectuer naturellement, pendant la saison des pluies, dans les terrains salés de basse altitude où les eaux pluviales s'accumulent, parfois pendant plusieurs mois. C'est par exemple le cas des « enganes » de la basse Camargue.

Le lessivage des sels hors du profil peut également être la conséquence des opérations de mise en valeur, sous l'effet de l'irrigation associée au drainage, dans les plaines alluviales en voie d'aménagement.

Dans le premier cas il s'agit d'une phase temporaire qui caractérise un des aspects de la dynamique du système sol-nappe, dans les terres basses salées : à la période de désalinisation hivernale fera suite une période estivale de salinisation *per ascensum*, l'ensemble étant marqué par le maintien du stock de sels dans le profil pédologique, l'aquifère salé jouant le rôle de barrière (Servant, 1975).

Dans le second cas, l'acquisition de l'état non salé peut être définitive car, si le drainage est efficace, le processus ascendant de salinisation peut être totalement inhibé par maintien de la nappe salée — source de l'halomorphie du sol — en dessous d'un niveau critique qui dépend de la nature texturale et structurale du sol.

Qu'il s'agisse de l'engane à salicornes soumise au jeu des facteurs naturels ou du sol salé en voie de mise en valeur, il apparaît que le processus de désalinisation s'opère le plus souvent dans un sol fortement humide sous l'effet, soit des inondations, soit des irrigations par submersion apportées à fortes doses.

(*) *Adresse actuelle* : Station d'agronomie, Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, *I.N. R. A.*, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe.

Dans ces conditions, le sol peut être considéré, la plupart des fois, comme un milieu dont la teneur en eau reste constante, le cas idéal étant constitué par le sol saturé d'eau. Il est alors possible d'utiliser un modèle théorique simple pour décrire le processus de désalinisation et pour prévoir l'évolution de la salinité sous l'effet de la pluviosité ou de l'irrigation.

I. — Description du modèle et saisie des données

Le modèle utilisé (d'après Van der Molen, 1973) s'applique au milieu saturé. Il repose sur un bilan classique des sels dans une tranche de sol saturé traversée par un flux hydrique.

Quantité de sels apportée par l'eau d'irrigation ou de pluie	—	Quantité de sels éliminée dans l'eau de drainage	=	Variation du stock de sels dans la tranche de sol considérée

soit :

$$C_i dH_i - C_d\, dH_d = \theta z dC\,. \qquad (1)$$

C_i : Conductivité électrique de l'eau d'irrigation ou de pluie (mmhos.cm^{-1} à 25 °C).

C_d : Conductivité électrique de l'eau de drainage (mmhos.cm^{-1} à 25 °C).

dH_i : Hauteur d'eau d'irrigation en cm.

dH_d : Hauteur d'eau de drainage en cm.

θ : Humidité volumique en cm^3/cm^3.

z: Epaisseur de la tranche de sol en cm.

dC : Variation de la conductivité électrique dans la solution du sol, C étant la conductivité électrique moyenne de la solution, dans la tranche de sol considérée, pendant la période considérée.

Le milieu étant saturé, on peut écrire que l'entrée d'une hauteur d'eau dH_i expulse une quantité égale d'eau de drainage.

Il vient alors :

$$dH_i = dH_d = dH\,. \qquad (2)$$

En vue d'apprécier C_d on admet que, dans le sol, sous l'effet de la dispersion hydrodynamique, l'eau d'irrigation ou d'inondation ne se mélange pas intégralement avec la solution du sol : une partie circule sans se mélanger et draine avec la conductivité C_i ; l'autre partie draine avec la conductivité C de la solution du sol. Le stock de sels contenu dans l'eau de drainage résulte du mélange de ces deux apports.

Il vient alors :

$$dHC_d = CkdH + C_i(1 - k)\, dH \qquad (3)$$

soit :

$$C_d = kC + (1 - k)\, C_i \qquad (4)$$

où : k est un coefficient de partage ($0 < k < 1$) qui dépend de la nature du sol.

La combinaison des équations (1), (2), (4) conduit à l'expression suivante :

$$k(C_i - C)\, dH = \theta z dC \qquad (5)$$

soit en séparant les variables :

$$\frac{dC}{C_i - C} = \frac{k\,dH}{\theta z}. \tag{6}$$

L'intégration de cette équation différentielle conduit au résultat suivant (k, θ et z étant des constantes) :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \exp - \frac{kH}{\theta z} \tag{7}$$

C_0 étant la conductivité initiale de la solution du sol avant la pluie ou l'irrigation.

La généralisation de ce modèle à une succession de couches de sol identiques, s'exprime par les équations suivantes :

1re couche :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \exp - \frac{kH}{\theta z}\ ; \tag{7}$$

2e couche :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \left(1 + \frac{kH}{\theta z}\right) \exp - \frac{kH}{\theta z}\ : \tag{8}$$

3e couche :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \left(1 + \frac{kH}{\theta z} + \frac{(kH)^2}{2\,\theta z}\right) \exp - \frac{kH}{\theta z}\ ; \tag{9}$$

p-ième couche :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \left[1 + \frac{kH}{\theta z} + \frac{(kH)^2}{2\,\theta z} \quad \frac{(kH)^3}{6\,\theta z} + \cdots + \frac{(kH)^{p-1}}{\theta z\,(p-1)}\right] \exp - \frac{kH}{\theta z}. \tag{10}$$

Ce modèle concerne donc le milieu traversé par un flux d'eau saturante qui draine d'une couche dans l'autre, le mouvement des sels étant identique à celui de l'eau, les processus de précipitation-solubilisation et d'adsorption-désorption étant négligés.

Dans l'équation (7) les termes C et C_0 sont mesurés *in situ* par « salinity-sensors » ou bougies poreuses mis en place dans la tranche de sol considérée. Le sensor permet la lecture directe de la conductivité électrique à 25 °C, sans aucun prélèvement. Au niveau de la bougie il est procédé à un prélèvement de la solution du sol.

Le terme C_i est directement mesuré dans l'eau d'irrigation ; θ est l'humidité volumique qui peut être déterminée par sonde à neutrons ou par prélèvement ; k est déterminé expérimentalement quand on a mesuré tous les autres paramètres.

II. — Application à différents cas

A. — *Niveaux d'intervention*

Le modèle précédemment décrit a été appliqué dans trois types de situations : dispositifs de laboratoire, lysimètre, terrain salé.

1. — *Dispositif de laboratoire.*

L'expérience est effectuée au niveau de cubes « Vergières » de sol non perturbé (1 000 cm^3), initialement non salé, soumis à des irrigations par des eaux salines puis par de l'eau distillée.

2. — *Expériences en lysimètre.*

Le sol de la case a été artificiellement salé puis soumis à un cycle continu d'irrigations en vue du dessalement (à ce niveau, la pluviosité est également prise en compte).

3. — *Utilisation sur le terrain.*

Il a été procédé à l'étude du processus hivernal de désalinisation, sous l'effet des précipitations, dans les sols salés de l'engane à salicornes de basse Camargue (Station de la Capelière).

B. — *Principe des mesures*

Les expériences intéressent la tranche supérieure des sols (épaisseur 10 à 30 cm suivant le cas). La salinité est mesurée *in situ* par « salinity-sensors » et/ou bougies poreuses, suivant le rythme journalier des irrigations dans les deux premiers cas, à intervalles mensuels dans le troisième cas. Au cours de ces expériences il est procédé à l'étude des variations de salinité *in situ* en fonction des hauteurs d'eau d'irrigation et/ou des pluviosités. L'équation (7) est exprimée sous la forme suivante :

$$C = C_i + (C_0 - C_i) \exp - \alpha H \qquad (11)$$

avec :

$$\alpha = \frac{k}{\theta z} .$$

Pour chaque couple (C, H) mesuré, on effectue le calcul de α d'après l'équation (11) ; soit $\alpha_1, \alpha_2 \ldots \alpha_n$. La valeur finale de α est la moyenne arithmétique $\bar{\alpha}$ entre ces différentes valeurs.

Connaissant expérimentalement α il est alors possible de représenter graphiquement, à partir de la valeur C_0, la courbe (11) qui se simplifie, quand on irrigue avec de l'eau douce ($C_i = 0$) à :

$$C = C_0 \exp - \alpha H . \qquad (12)$$

On compare la courbe expérimentale à la courbe théorique (11) et il est alors possible d'examiner la validité du modèle.

C. — *Analyse de quelques résultats*

1. — *Sur cube Vergières.*

Les courbes théoriques représentées sur la figure 1 expriment les variations de salinité au cours de plusieurs cycles salinisation-désalinisation (moyennes sur deux cubes vergières). L'allure générale des courbes montre un amortissement progressif des processus au cours du temps. Les points expérimentaux s'alignent assez bien le long des

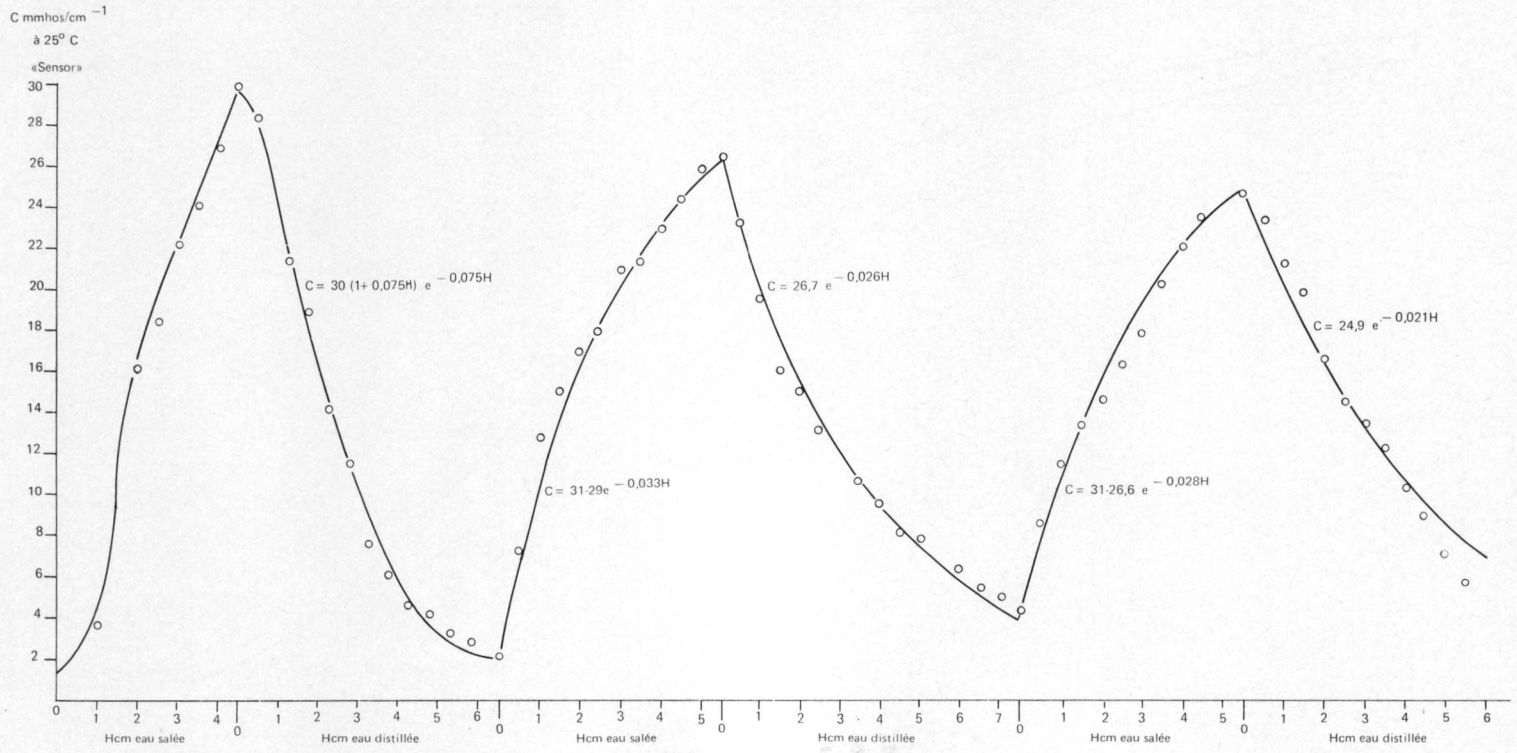


FIG. 1. — *Successions salinisation-désalinisation sur cubes « Vergières ».*
Successions of salinization and desalinization on « Vergières » cubic samples.

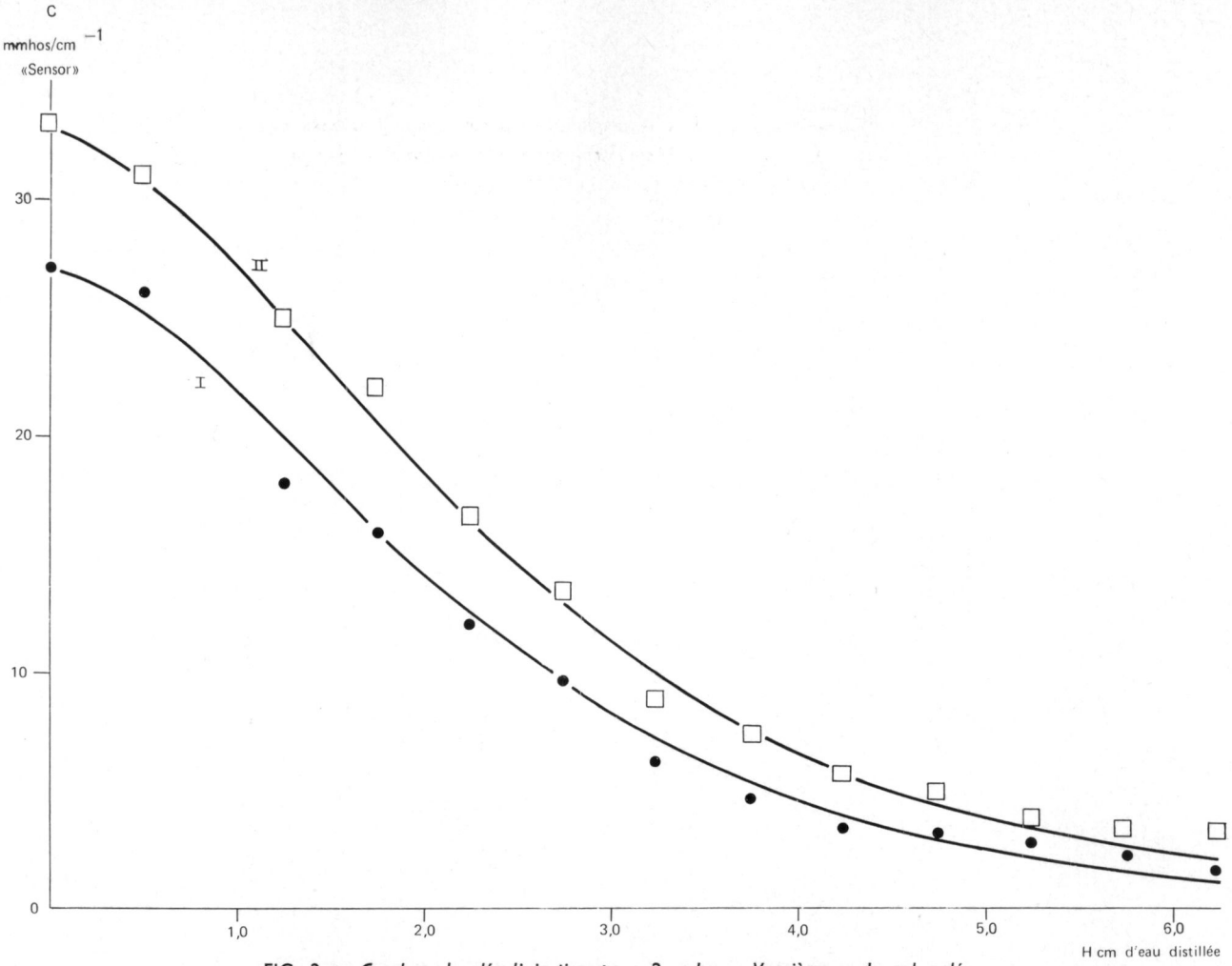


FIG. 2. — *Courbes de désalinisation pour 2 cubes « Vergières » de sol salé.*
Desalinization curves of two « Vergières » cubic samples of saline soil.

$C = C_0 (1 + \alpha H)\, e^{-\alpha H}$

I : $C = 27\ 1 + 0{,}085\ H)\, e^{-0{,}085H}$

II : $C = 33\ (1 + 0{,}075\ H)\, e^{-0{,}075H}$

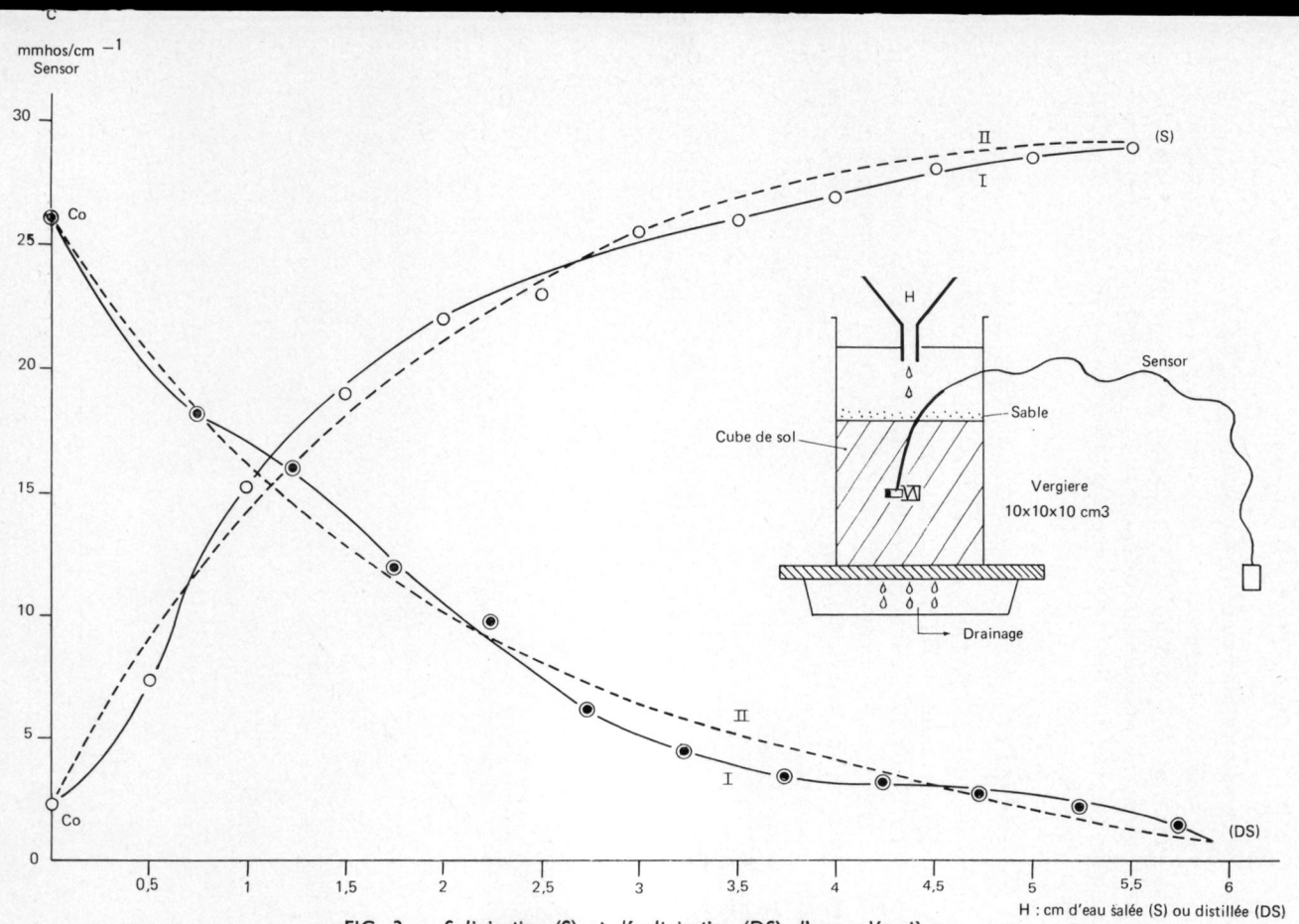


FIG. 3. — *Salinisation* (S) *et désalinisation* (DS) *d'une « Vergière ».*

Salinization (S) and desalinization (D) of a « Vergière » sample.

I : Courbes expérimentales — Experimental curves

II : Courbes théoriques — Theoritical curves

(S) : $C = C_i + (C_0 - C_i)\, e^{-\alpha H}$

$C = 31 - 29\, e^{-0,055H}$

(DS) : $C = C_0\, e^{-\alpha H}$

$C = 26\, e^{-0,048H}$.

courbes théoriques. Il faut toutefois noter qu'au cours de la première désalinisation, c'est un modèle de deuxième couche

$$C = C_0(1 + \alpha H) \exp - \alpha H \qquad (13)$$

qui rend le mieux compte du phénomène (voir détails sur la fig. 2).

Les courbes de type première couche sont représentées en détail sur la figure 3 pour une des Vergières. On constate que la courbe expérimentale présente une forme ondulante autour de la courbe théorique mais l'allure générale du phénomène est bien décrite par les courbes théoriques exponentielles aussi bien pour la salinisation que pour la désalinisation.

2. — *Etude en lysimètre.*

Le dessalement en continu de l'horizon 0-20 cm dans une case lysimétrique artificiellement salée (Biedermann, 1977) donne, par rapport au modèle théorique, des résultats moins bien ajustés que dans le cas précédent (voir fig. 4). Le système est plus compliqué car, au rythme régulier des irrigations, s'ajoute l'effet des pluies. Les différentes valeurs calculées du coefficient α varient entre 0,037 et 0,063, la moyenne de vingt et une mesures étant 0,056.

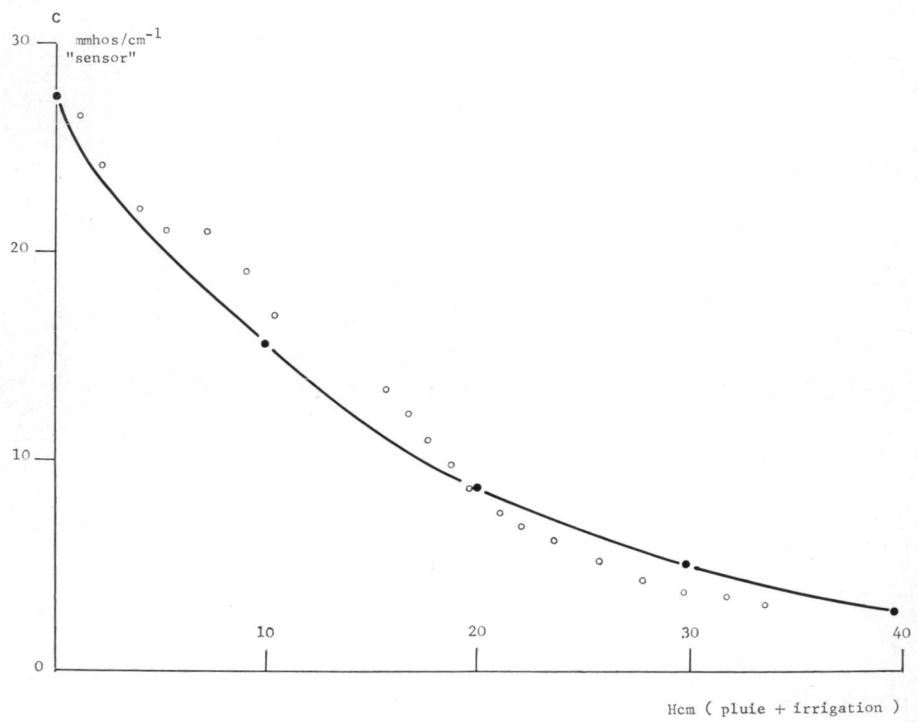


FIG. 4. — *Case lysimétrique. Désalinisation de l'horizon* 0-20 cm.
Lysimeter. Desalinization of the 0-20 cm horizon.
$C = 27{,}5\ e^{-0{,}056H}$.

On a donc :

$$C = C_0 \exp - \alpha H$$

avec C_0 initial = 27,5 mmhos.cm^{-1} à 25 °C, $\alpha = 0{,}056$.

Dans cette expérience il a été possible de calculer le coefficient k de l'équation (7) car le modèle à une couche peut être utilisé.

On a en effet :

$$\alpha = \frac{k}{\theta z}$$

avec $\theta = 0{,}43$ cm^3/cm^3, $z = 20$ cm, $\alpha = 0{,}056$.

D'où :

$$k = 0{,}056 \times 0{,}43 \times 20 = 0{,}48.$$

Cette valeur est en accord avec les fourchettes fixées par Van der Molen ($k = 0{,}4$ à $0{,}5$ pour les sols de texture argilo-sableuse et limoneuse), le sol étudié présentant une texture d'argile limono-sableuse.

3. — *Etude sur le terrain.*

Cette étude concerne l'évolution de la salinité dans l'horizon 0-30 cm d'une engane à salicornes* en Camargue (Station de la Capelière près de l'étang de Vacca-

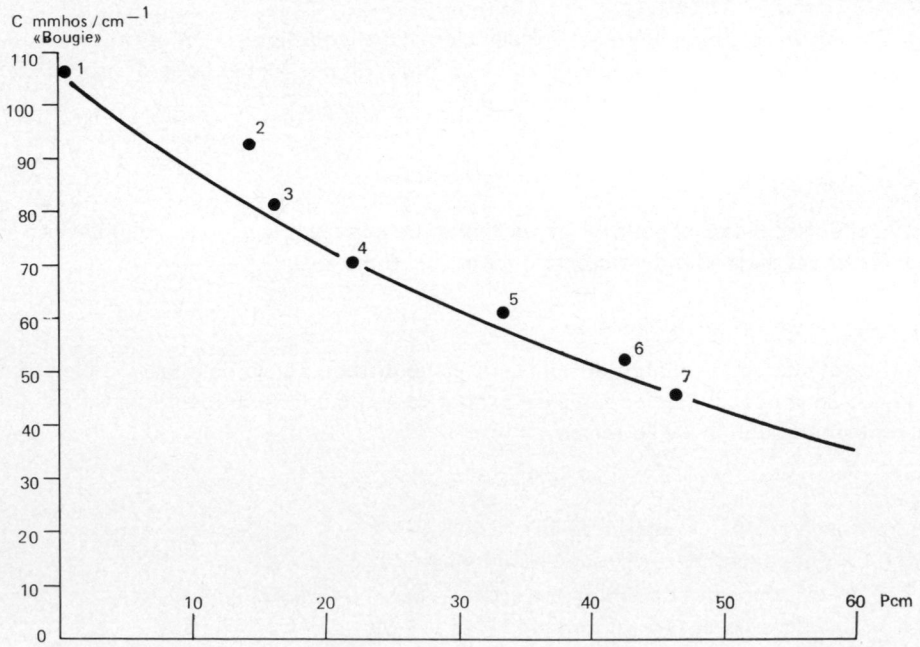


FIG. 5. — *Désalinisation de l'horizon* 0-30 cm (*Station de la Capelière en Camargue*).

● Points expérimentaux
Courbe : $C = C_0\, e^{-0{,}018P}$ avec $C_0 = 105$.

* Terrain salé de basse Camargue, colonisé par une végétation de *Salicornia fruticosa* et généralement très humide pendant une grande partie de l'année.

rès) (Servant, 1977). Au cours de la période considérée, qui s'étend d'août 1975 à février 1976, le sol est resté très humide et la salinité de l'horizon 0-30 cm (mesure bougie) a régulièrement baissé sous l'influence d'une pluviosité qui a globalement été de 464 mm.

Selon le même principe que précédemment, la courbe théorique a été déterminée, d'équation : $C = 105 \exp - 0{,}018\ P$, avec $C_0 = 105$ mmhos.cm^{-1}, P étant la pluviosité. Les points expérimentaux sont assez bien en accord avec ce type de distribution (voir fig. 5). Le tableau ci-après compare les valeurs mesurées et les valeurs calculées par le modèle.

Prélèvements	C mesuré (bougies)	C calculé par le modèle	P cm cumulé
18-08-75	$C_0 = 105$	$C_0 = 105$	0
15-09-75	91	82	14
6-11-75	80	78	16,3
20-11-75	70	71	21,9
9-01-76	61	58	33,0
11-02-76	50	49	41,9
27-02-76	46	46	46,4

Dans cette situation, le calcul du coefficient k de l'équation (11) a fourni : $k = 0{,}24$, ce qui correspond bien aux valeurs données par Van der Molen pour des sols de texture fine argileuse ou argilo-limoneuse ($0{,}2 < k < 0{,}3$).

D. — *Discussion*

Cette discussion a pour objet de tenter de préciser les limites d'utilisation du modèle et des méthodes de mesures qui ont été employées.

1. — *Expression de la salinité.*

La salinité de la solution du sol *in situ* est exprimée par la conductivité électrique à 25 °C. La conductivité électrique est proportionnelle à la quantité d'ions en solution suivant une équation de la forme :

$$pCE = \sum A = \sum C\ .$$

p est un coefficient voisin de 10

CE = conductivité électrique en millimhos.cm^{-1} à 25 °C.

$\sum A$ = somme des anions en me/l ($Cl^- + SO_4^{--} + HCO_3^- + CO_3^{--}$).

$\sum C$ = somme des cations en me/l ($Na^+ + Mg^{++} + Ca^{++} + K^+$).

Les anions, où Cl^- est très largement dominant, ne sont pas soumis à l'adsorption par les argiles. La mesure de conductivité nous informe donc directement sur le départ ou l'arrivée d'ions Cl^- au niveau du site de mesure, sous le simple jeu du transfert, sans interaction avec le sol. D'autre part, le sol restant humide, les processus de précipitation-solubilisation de NaCl ne sont pas à considérer.

En ce qui concerne les cations où Na^+ est largement dominant, le processus est bien plus complexe car des phénomènes d'échange interviennent entre la solution saline imprégnant le sol et le matériau pédologique. La mesure de conductivité effectuée informe donc à la fois sur le simple transfert de cations et également sur l'échange des cations, mais il n'est pas possible de distinguer ces processus dans les expériences qui ont été décrites.

2. — *Techniques de mesure.*

Les techniques de mesure *in situ* de la salinité utilisées dans les expériences précédentes sont de deux types : « salinity-sensors » et bougies poreuses.

a) *Les sensors.*

Les électrodes du sensor sont contenues dans une petite capsule de porcelaine qui se met en équilibre ionique avec le sol. La lecture de la conductivité électrique s'opère directement sur un appareil de mesure, la correction de température à 25 °C étant effectuée par un thermistor.

L'expérience prouve que le sensor répond rapidement en quelques heures (6 à 8 h) à d'importantes variations de salinité dans le milieu. Il est donc nécessaire d'attendre au moins 8 h entre deux mesures, le sensor se trouvant alors en équilibre avec le sol. Il faut noter que le sensor présente l'inconvénient de n'effectuer qu'une mesure très ponctuelle, compte tenu de sa faible taille. Il est bien utile dans des expériences de laboratoire sur petits échantillons. Son utilisation en plein champ pose certains problèmes. On note en particulier une incertitude sur la mesure quand la salinité devient trop élevée (supérieure à 30 millimhos.cm^{-1}) ou quand le sol s'assèche (le sensor « décroche » avant le point de flétrissement et l'idéal est d'effectuer la mesure autour de la capacité de rétention ou dans un état plus humide).

b) *Les bougies poreuses.*

Elles explorent un volume de sol plus important que dans le cas des sensors. Elles ne peuvent être utilisées que dans des sols humides puisque la dépression exercée dans la bougie n'excède pas 90 centibars. La période d'extraction en sol humide est de 4 à 6 h. L'accès direct aux « solutions du sol » autorise des déterminations analytiques variées. Combinées avec des sensors, elles permettent un suivi très intéressant d'expériences en lysimètres ou en plein champ.

3. — *Conditions particulières des expériences décrites.*

Les expériences effectuées ne permettent pas de suivre en continu les variations de salinité dans le sol puisque les mesures sont liées aux temps de réponse des capteurs. La méthode générale utilisée est celle des irrigations successives, les mesures étant effectuées à intervalles de temps constants, à l'issue de chaque impulsion. C'est probablement une des raisons pour lesquelles le modèle utilisé a permis de décrire assez convenablement la distribution des sels dans des matériaux soumis à un contact direct avec les eaux d'irrigation. Il reste à préciser, dans de nouvelles expériences, les limites exactes de validité du modèle selon : le régime des impulsions, le niveau de salinité, les caractéristiques géométriques et minéralogiques du sol.

Conclusion

L'utilisation d'un modèle de désalinisation en sol humide saturé ou proche de la saturation donne des résultats assez satisfaisants en ce qui concerne la couche supérieure des sols, directement soumise à l'impact des eaux de pluie ou d'irrigation. Le cas des horizons sous-jacents apparaît plus complexe et ne répond pas exactement au modèle. Il n'a pas été examiné dans la présente note.

Enfin, il faut signaler que l'emploi de cubes « Vergières » paraît intéressant comme test d'appréciation de la susceptibilité d'un sol à la salinisation et à la désalinisation, dans le cas d'opérations de mise en valeur. Ce test pourrait être précisé et étendu à différents types de sols.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Remerciements

L'auteur remercie M. R. Calvet (Station de Science du Sol, I. N. R. A., Versailles) pour ses remarques constructives lors de la lecture du projet de publication.

Summary

Using a desalinization model in saturated soils

A theoretical model (Van Der Molen, 1973) has been used to describe the desalinization process of saturated soils during irrigation or under the influence of rainwater.

The model was first checked in laboratory experiments on « Vergières » cubic samples of indisturbed soil which have been irrigated by saline water, then desalinized by distilled water.

The second step concerns the desalinization of the top-soil of a lysimeter which has been artificially salinized.

The third example takes place in the fields : winter desalinization of the 0-30 cm horizon, in the saline soils of the Rhône River Delta (Basse Camargue).

In these three experiments, salinity has been measured *in situ* with salinity sensors and/or with vacuum water samplers.

The results are expressed on five graphs where experimental datas are compared with theorical curves.

The agreement between theorical and experimental datas is good enough for a first and sometimes for a second layer model. The case of deeper horizons which does not agree with the model has not been described in this paper.

Zusammenfassung

Anwendung eines Entsalzungsmusters auf Feuchtboden

Der Vorgang der Versalzung und Entsalzung einer Bodenschicht unter Einwirkung der Bewässerung und/oder der Niederschlagsmenge wurde mit Hilfe eines einfachen theoretischen Musters untersucht, das auf vernässten oder beinahe vernässten Feuchtboden anwendber war. Die erzielten Ergebnisse betreffen Laborversuche, einen Versuch im Lysimeter und eine Untersuchungsvorrichtung im gesalzenen Boden der Camargue. Im Laufe dieser Untersuchungen wurde der Salzgehalt mit « porösen Kerzen » und/oder « salinity sensors » *in situ* bestimmt. Der Vergleich der theoretischen und experimentellen Kurven ermöglicht es, die Gültigkeit des Modells zu erproben. Unter den Versuchsbedingungen scheint dieses Muster ziemlich zuverlässig zu sein, wenn die Bodenschicht direkt vom Aufschlag der Bewässerungs- und Regenwasser betroffen ist.

РЕЗЮМЕ

Применение модели рассоления во влажной почве.

Ж. СЕРВАН.
при техническом сотрудничестве С. КОВЕНТИ.

На простой теоритической модели, применявшейся в увлажненной до насыщения и (или) положения близкого к насыщенности почве, изучались процессы засоления, или рассоления почвенного слоя под влиянием орошений. Приведенные результаты касаются лабораторных опытов, эксперимента проводившегося в лизиметрах, и опыта применения специального приспособления предназначенного для изучения засоленных почв района Камарг. Засоленность определялась в течении этих опытов « in situ », при помощи пористых фильтров и (или) детекторов засоления (« salinity sensors »). Сравнение теоритических кривых с экспериментальными позволяет судить о годности модели. В условиях опыта, модель казалась достаточно надежной, в случаях слоя почвы находившегося под прямым импактом оросительных или дождевых вод.

Références bibliographiques

BIEDERMANN J. L., 1977. *Etude du lessivage du chlorure de sodium en case lysimétrique.* D. E. A. ENSAM-S. E. S. Montpellier, ronéo 31 p.

SERVANT J., 1975. *Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France.* Thèse doctorat d'Etat. Université de Montpellier, S. E. S., INRA, Montpellier, 2 tomes.

SERVANT J., 1977. *Caractérisation et dynamique des sols salés en Camargue* (à paraître).

VAN DER MOLEN W. H., 1973. Salt balance and leaching requirement. In *Drainage principles and application*, vol. II, p. 60. International Institute for land reclamation and improvement : Wageningen, the Netherlands.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 147-167.

Influence des propriétés physiques et mécaniques du sol sur la morphologie et le rendement en racine de la betterave à sucre

H. METTAUER, Y. TUAL, R. HAEFLINGER, A. P. CONESA et R. TRENDEL

avec la collaboration technique de P. GROSS *

Station d'agronomie INRA,
68021 *Colmar*

* *Sucrerie d'Ernstein*
67150 *Ernstein*

Résumé

L'étude de l'influence des propriétés physiques et mécaniques des sols sur la morphologie et le rendement en racine des betteraves à sucre a été effectuée dans le cadre d'une enquête globale de l'agrosystème betteravier, réalisé en Alsace au cours de la campagne 1976, en vue d'une meilleure connaissance des facteurs et conditions qui limitent la productivité et la qualité de la betterave à sucre.

L'étude a montré que les rendements en racines dépendent essentiellement des deux composants morphologiques, longueur et circonférence, lesquelles ne réagissent pas aux mêmes facteurs. La croissance en longueur dépend surtout des constituants physiques qui déterminent le comportement physique et mécanique des sols ; la croissance en épaisseur étant davantage liée aux facteurs nutritionnels, à l'humidité des sols et à la densité de population.

Les méthodes statistiques employées étaient l'analyse en composante principale, la régression par l'analyse des correspondances et la régression progressive.

Une représentation schématique du système analysé a été tentée en vue d'une modélisation ultérieure.

I. — Introduction

Plusieurs auteurs ont étudié le comportement physique des sols en relation avec leur constitution. Ainsi Hénin *et al.* (1960), Kheyrabi et Monnier (1968) ont examiné la stabilité structurale des sols en fonction de leur composition granulométrique, de leurs teneurs en matières organiques et de la constitution ionique du complexe adsorbant. Rémy (1971) a mis en lumière les relations entre les indices de plasticité et les constituants du sol, et Faure (1971), Faure et Fiès (1972) ont analysé l'influence des taux d'argile et de sable sur les mécanismes du compactage.

Au niveau des interactions culture-sol, on dispose de moins d'informations quant aux effets de ces comportements physiques sur l'enracinement des plantes cultivées ; Maertens (1964) a montré l'influence du tassement sur la pénétration des racines dans le sol, Blanchet *et al.* (1974) ont mis en lumière les effets du tassement et de l'humidité

du sol sur la colonisation du sol par les racines. Ces travaux ont été en général réalisés en laboratoire. Au niveau des cultures en plein champ, Gras *et al.* (1971), Rémy et Marin Laflèche (1974) ont montré, entre autres, l'influence de la granulométrie et de l'hydromorphie sur le pourcentage de levée des betteraves à sucre et sur les rendements en racine. Monnier *et al.* (1963) ont traité de problèmes que pose la préparation des sols par différentes techniques en relation avec la morphologie des betteraves. Black *et al.* (1960) ont mis en évidence l'influence de la compaction sur la morphologie des racines et la teneur en sucre, et Russel (1956) a étudié les rendements des betteraves à sucre en fonction des profondeurs de labour.

On sait que les propriétés liées à la texture et à la structure des sols conditionnent l'environnement mécanique et nutritif de la plante. La betterave à sucre constitue un matériel végétal très sensible aux facteurs physiques du fait de son type d'enracinement pivotant. Ces considérations nous ont conduits à étudier les relations qui existent entre ses modalités d'enracinement et le comportement physique et mécanique des sols. Nous avons effectué le travail dans le cadre d'une enquête globale de l'agrosystème betteravier, réalisée en Alsace au cours de la campagne 1976, en vue d'appréhender les facteurs et conditions qui limitent la productivité et la qualité des betteraves sucrières (Haeflinger *et al.*, 1977).

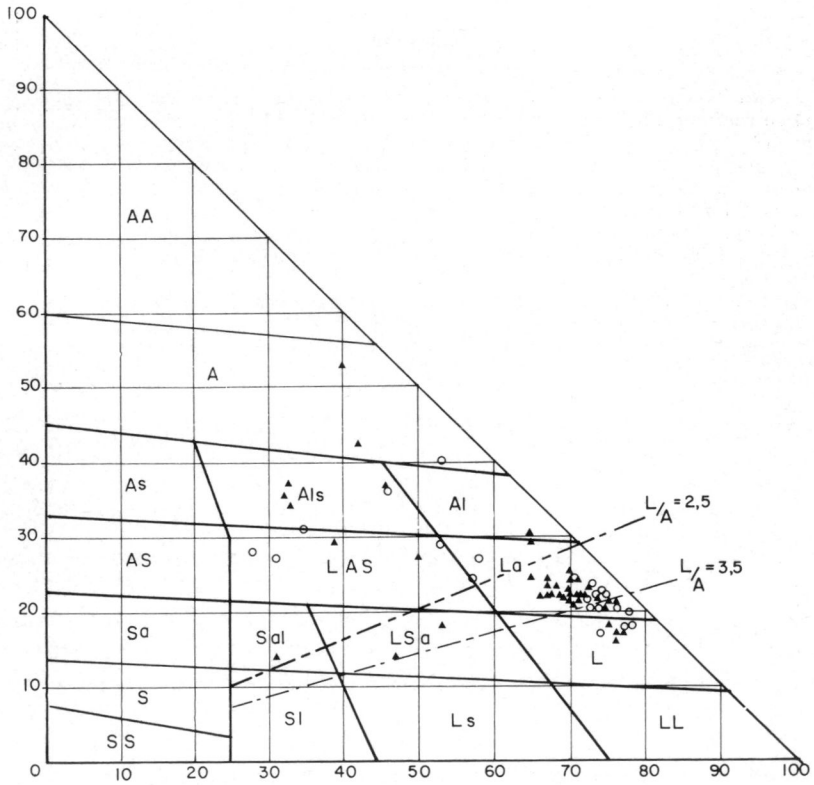


FIG. 1. — *Texture des sols étudiés. Texture of the studied soils.*

▲ Sols calcaires (calcareous soils).

○ Sols non calcaires (uncalcareous soils).

II. — Méthodes et techniques

L'étude a été réalisée sur quatre-vingt-deux placettes (de 15 m²) représentatives des sols des grandes zones betteravières d'Alsace (fig. 1) : sols de limons plus ou moins décarbonatés (lœss, lœss-lehm), sols alluviaux calcaires (plaine rhénane) ou acides (plaine de l'Ill) plus ou moins humifères.

2.1. — *Variables étudiées*

Les variables étudiées sont regroupées dans le tableau 1 suivant leur mode d'obtention :

TABLEAU 1

Variables prises en compte

Variables taken into account

	Mode d'obtention	Variables
Placette	Analyse	Texture, mat. org., calcaire (en p. 100), N, P, K, Ca, Mg, Mn, (en p. 1 000)
	Mesure	Densité apparente, profil hydrique, humidité équivalente (p. 100), point de flétrissement (p. 100), courbe Proctor, stabilité structurale (p. 100) et perméabilité (cm/h)
	Observation	Profil pédologique, profil cultural
	caractères liés aux techniques	profondeur de labour, semelle, tassements, etc.
Plante	Analyse	Analyse chimique complète, qualité technologique
	Observation	Densité de population, régularité des semis ($Id = \sigma^2/\bar{x}$), profil racinaire, betterave fourchue (p. 100)
	Mesure	Poids, longueur, diamètre, rendement
Parcelle	Interview	Historique de la parcelle : rotation, précédent cultural. Façons culturales : préparation du sol, amendement, fumure, semis (date, mode, densité), traitements phytosanitaires

2.11. *Caractérisation physique des sols.*

Sensibilité au tassement.

Nous avons défini la sensibilité au tassement $\Delta\lambda$ d'un sol par la différence de densité apparente entre le minimum et le maximum de la courbe Proctor qui permet d'exprimer les variations de la densité apparente en fonction de l'humidité, sous l'effet d'un tassement dynamique à énergie constante. Les courbes sont établies selon

la technique adaptée aux sols agricoles par Faure et Fiès (1972). La figure 2 montre quelques courbes caractéristiques de sols rencontrés.

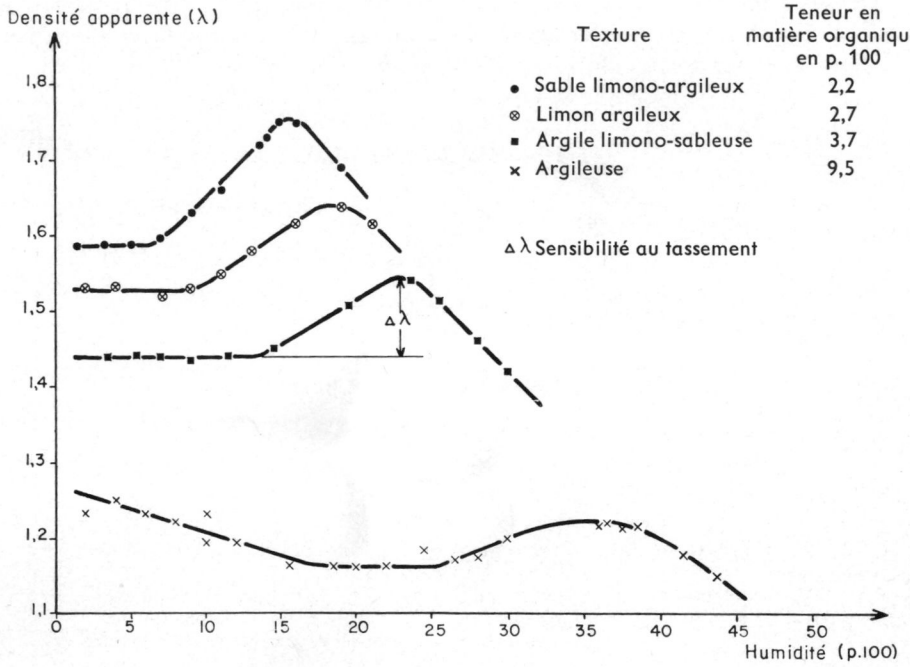


FIG. 2. — *Courbes de compacité d'après le test « Proctor » de sols betteraviers typiques d'Alsace.*
Compaction curves of typical soils cropped with suggar beet in Alsace, by the Proctor test.

Densité apparente des sols en place.

Pour des raisons de contraintes matérielles nous n'avons effectué qu'une mesure de densité par placette. Ce nombre est nettement insuffisant, si l'on veut appréhender un état physique du terrain compte tenu de son hétérogénéité.

Stabilité structurale.

Cette caractéristique a été déterminée à l'aide du test de Hénin (1960) : agrégats stables aux prétraitements alcool (Aga), benzène (Agb) et air (Age) (fig. 3).

Profil cultural et profondeur de labour.

Nous avons réalisé deux profils culturaux, le premier au moment du semis, le second au moment de la récolte, en vue de mieux cerner l'état du sol et son évolution au cours de la culture.

2.12. *Caractérisation des betteraves sucrières.*

Petites betteraves (non marchandes).

Outre la mesure des rendements en racines, nous avons compté l'ensemble des petites betteraves (diam. $<$ à 5 cm) rencontrées.

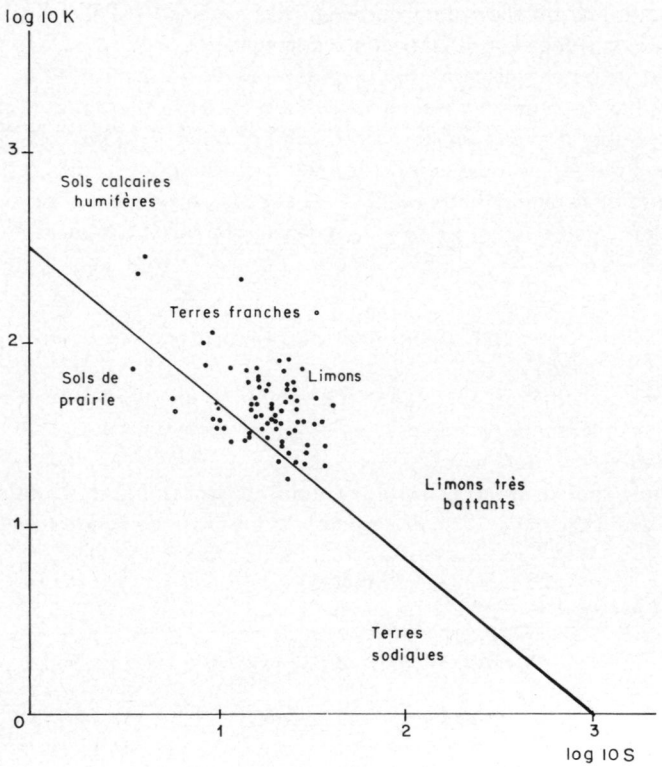


FIG. 3. — *Stabilité structurale des sols étudiés.*
Structural stability of the studied soils.

Betteraves fourchues.

On connaît la grande sensibilité de la betterave aux hétérogénéités structurales du sol, aussi, l'observation détaillée des modalités d'enracinement du pivot permet-elle de compléter les données recueillies par l'enquête et par l'étude du profil cultural (+ photos). La morphologie de la racine traduit en effet les difficultés qu'a rencontrées la betterave lors de son enracinement ; elle conditionne également l'importance de la tare et le coût du transport. D'autre part les betteraves fourchues ont tendance à grossir davantage en surface, ce qui peut entraîner des pertes de rendement par suite d'un décolletage excessif.

2.2. — *Dépouillement statistique*

L'étude de la structure globale des variables pouvait s'envisager de deux façons : soit l'analyse en composantes principales (Bertier et Bouroche, 1975), soit la régression par l'analyse des correspondances (R. A. C.) utilisée par l'un de nous (Conesa *et al.*, 1976). La première méthode fait appel à l'analyse de variance et nécessite que l'on vérifie la normalité de la distribution des variables utilisées ; elle décrit correctement les liaisons linéaires, mais ne permet pas d'intégrer les variables qualitatives. Nous avons donc préféré la R. A. C., méthode plus robuste qui permet d'inclure les variables

qualitatives pour l'explication des rendements en racines (RR) et des composantes de ces rendements (longueur (LON) et circonférence (CIR)). Nous avons également utilisé les matrices de corrélation afin de quantifier les liaisons entre variables. Nous avons enfin utilisé la régression progressive sur les variables quantitatives les plus discriminantes, afin d'expliquer les deux composantes longueur et circonférence. L'analyse globale a été complétée par des régressions simples, des tests du χ^2 appliqués sur des tableaux de contingence (2×2) et des comparaisons de moyennes. Ces différents traitements nous ont permis de contrôler la signification des liaisons dégagées par la R. A. C.

III. — Exposé des résultats

Nous avons constaté, en 1976, que les rendements en sucre étaient surtout déterminés par les rendements en racines, eux-mêmes fortement liés à la morphologie moyenne (longueur-circonférence).

Les résultats sont présentés, soit par rapport à l'ensemble des quatre-vingt-deux placettes, soit par rapport à un sous-ensemble « limons » de soixante-deux placettes.

TABLEAU 2

Valeurs caractéristiques des variables étudiées
Characteristic values of the variables in study

	Quatre-vingt-deux placettes				Soixante-deux placettes			
	$\bar{X}$	σ	Min.	Max.	$\bar{X}$	σ	Min.	Max.
Rendt. bett. t/ha.....	58,7	13,6	32,7	85,8	57,9	13,6	32,7	81,8
Longueur cm	26,2	3,1	17,1	34,7	26,1	3,1	17,1	34,7
Circonférence cm	28,7	3,9	20,9	39,9	29,0	4,1	20,9	39,9
Poids moy. en g	727	273	300	1 670	743	291	300	1 670
Densité population mille/ha	86,4	21,7	30,0	144,0	83,7	21,4	30,0	144,0
p. 100 Argile	24,2	6,1	14,5	52,2	22,0	2,3	16,6	28,2
A/L	0,41	0,23	0,22	1,29	0,31	0,05	0,22	0,46
p. 100 Mat. Org.	2,6	1,1	1,4	9,5	2,3	0,4	1,4	3,6
p. 100 calcaire	6,1	6,2	0	23,2	5,5	5,2	0	18,4
p. 100 Sable cal.	1,6	2,1	0	9,3	1,3	1,6	0	6,1
Mn en ppm	28,3	19,4	7,9	98,4	30,7	21,3	9,0	98,4
p. 100 Aga	34,5	11,8	15,3	71,0	30,3	7,0	15,3	59,3
p. 100 Age	12,4	9,8	3,2	50,7	8,7	3,4	3,2	30,0
Sens. au tassement g/cm^3	0,11	0,03	0,04	0,17	0,12	0,02	0,09	0,16
H. équi. p. 100	23,9	2,7	18,1	41,6	23,3	1,0	19,6	26,1
p. 100 H. S/sol avril	21,3	4,4	14,3	31,8	20,2	1,3	17,7	24,8
p. 100 H. S/Sol juillet ...	12,3	6,6	5,5	31,1	10,9	2,4	7,3	20,0
p. 100 H. S/Sol septembre	12,6	8,4	6,9	29,1	10,7	1,5	7,4	15,6

Cette subdivision s'est avérée nécessaire, car l'effet de certaines variables explicatives se manifeste lorsqu'on considère la classe des sols de limon qui était la plus importante. Le tableau 2 résume les caractéristiques des principales variables étudiées (moyennes, minimum, maximum, écarts-types) ; le tableau 3 indique les contributions des différentes classes.

3.1. — *Rendement en racine* (RR)

La R. A. C. (fig. 4) sur quatre-vingt-deux placettes montre que les rendements faibles correspondent aux variables suivantes : faibles longueurs (LON), circonférences (CIR) et poids des racines (P), faibles taux d'agrégats stables alcool (Aga), faibles taux d'argile, de calcaire et manganèse (EDTA) des sols, faibles taux d'humidité en avril et juillet et faibles profondeurs de labour. Sur les forts rendements sont intervenus les variables morphologiques (valeurs élevées pour CIR, LON, P), les variables liées à l'état hydrique (fortes humidités des sous-sols en juillet et septembre) et certains

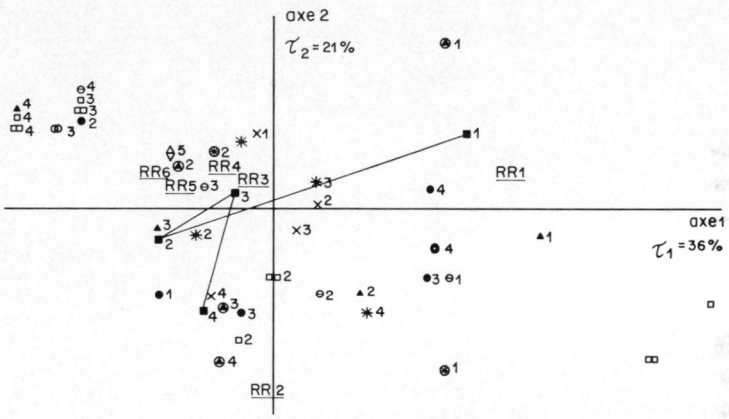


FIG. 4. — *R. A. C. sur les rendements en racines.*

Regression by the analysis of the correspondances on the root yield.

- ▫ CIR (circonférence moyenne).
- ▫▫ poids moyen.
- ▲ LON (longueur moyenne).
- ✱ dpop (densité de population à la récolte).
- ✪ p. 100 A (teneur en argile).
- × MO (teneur en Mat.Org.).
- ⊖ $CaCO_3$ (teneur en calcaire total).
- ○ $CaCO_3S$ (teneur en sable calcaire).
- • Mn (teneur en manganèse EDTA).
- ▣ A/L (rapport argile-limon).
- ■ Ag A (agregat alcool en p. 100).
- ▨ Ag E (agregation air en p. 100).
- △ $\Delta\lambda$ (sensibilité au tassement).
- ● Profondeur de labour.
- • Humidité avril hor. : 20-40 cm.
- ▩ Humidité juillet hor. : 20-40 cm.
- ▩ Humidité juillet hor. : 40-60 cm.
- ▬ Humidité septembre hor. : 20-40 cm.

- ⊕ Date de reprise de labour.
- ⊛ Date du semis.
- ● Nombre de binage.

TABLEAU 3

Tableau des contributions des variables retenues pour les RAC effectuées sur soixante-deux échantillons
Contribution of the variables kept for the « A. C. R. » made on sixty-two samples

Variables	Classes	Limites de classe	Longueur		Circonférence	
			1er axe	2e axe	1er axe	2e axe
Longueur LON en cm	1	$\leqslant 23{,}1$	383	61		
	2	$23{,}1 < x \leqslant 24{,}6$	124	70		
	3	$24{,}6 < x \leqslant 26{,}1$	7	653		
	4	$26{,}1 < x \leqslant 27{,}3$	2	30		
	5	$27{,}3 < x \leqslant 28{,}6$	148	185		
	6	$28{,}6 < x \leqslant 34{,}7$	335	1		
Circonférence CIR. en cm	1	$\leqslant 25{,}1$			237	191
	2	$25{,}1 < x \leqslant 26{,}0$			190	593
	3	$26{,}0 < x \leqslant 28{,}2$			10	15
	4	$28{,}2 < x \leqslant 30{,}7$			1	20
	5	$30{,}7 < x \leqslant 33{,}0$			39	115
	6	$33{,}0 < x \leqslant 39{,}9$			523	63
Rapport $\frac{\text{Argile}}{\text{Limon}}$	1	$\leqslant 0{,}26$	81	10	53	3
	2	$0{,}26 < x \leqslant 0{,}30$	5	5	6	5
	3	$0{,}30 < x \leqslant 0{,}36$	9	0	6	11
	4	$0{,}36 < x \leqslant 0{,}59$	21	9	9	8
Calcaire p. 100	1	$\leqslant 0{,}4$	49	5	18	0
	2	$0{,}4 < x \leqslant 4{,}8$	2	20	0	2
	3	$4{,}8 < x \leqslant 10{,}3$	4	13	11	1
	4	$10{,}3 < x \leqslant 18{,}4$	12	11	2	0
Sable calcaire p. 100	1	$\leqslant 0$	69	12	40	1
	2	$0 < x \leqslant 7$	0	9	5	13
	3	$7 < x \leqslant 30$	8	3	5	27
	4	$30 < x \leqslant 61$	65	25	61	5
Matière organique p. 100	1	$\leqslant 2{,}02$	16	0	1	26
	2	$2{,}02 < x \leqslant 2{,}35$	4	0	8	20
	3	$2{,}35 < x \leqslant 2{,}57$	10	1	3	20
	4	$2{,}57 < x \leqslant 3{,}56$	10	4	35	30
Agrégats alcool p. 100	1	$\leqslant 6{,}8$	64	1	36	14
	2	$6{,}8 < x \leqslant 8{,}3$	1	1	0	2
	3	$8{,}3 < x \leqslant 10{,}1$	27	16	31	2
	4	$10{,}1 < x \leqslant 30{,}0$	3	3	1	17
Profondeur de labour en cm ...	1	$\leqslant 23$	3	31	4	14
	2	$23 < x \leqslant 27$	1	2	2	1
	3	$27 < x \leqslant 35$	0	36	1	13
Densité de population d. pop. (mille/ha)	1	$\leqslant 68$	43	11	86	31
	2	$68 < x \leqslant 83$	1	7	0	14
	3	$83 < x \leqslant 97$	0	0	7	13
	4	$97 < x \leqslant 144$	30	0	62	31
Humidité du s/sol 40-60 cm en juillet en p. 100	1	$\leqslant 10{,}4$	38	24	49	29
	2	$10{,}4 < x \leqslant 12{,}2$	7	16	1	1
	3	$12{,}2 < x \leqslant 13{,}7$	1	24	5	22
	4	$13{,}7 < x \leqslant 20{,}3$	8	19	17	0
Humidité s/sol 20-40 cm en septembre en p. 100	1	$\leqslant 9{,}9$	60	27	37	21
	2	$9{,}9 < x \leqslant 10{,}7$	12	3	4	25
	3	$10{,}7 < x \leqslant 11{,}5$	5	2	27	0
	4	$11{,}5 < x \leqslant 15{,}6$	4	5	11	0
Humidité du s/sol 20-40 cm en avril en p. 100	1	$\leqslant 67$	18	32	5	2
	2	$67 < x \leqslant 75$	5	15	0	2
	3	$75 < x \leqslant 86$	11	32	0	14
	4	$86 < x \leqslant 106$	15	14	7	46

constituants des sols (forte teneur en calcaire, teneur faible à moyenne en Mn). Aucune des variables « comportement physique des sols » n'est intervenue à ce niveau. Quant aux labours les plus profonds, ils n'ont pas entraîné d'augmentation de rendements par rapport aux profondeurs moyennes.

Le calcul des corrélations confirme certaines liaisons dégagées par la RAC, telles que les liaisons du rendement racine avec la morphologie ($r = 0,57$), avec le calcaire ($r = 0,37$) et avec les réserves hydriques des sous-sols en avril et en juillet ($r = 0,30$). Signalons également que les rendements sont fortement liés aux pluies de juillet et août ($r = 0,41$) et que la liaison est positive avec les profondeurs de labour et significative au seuil de 5 p. 100.

Régression progressive.

Une régression progressive globale a été effectuée en tenant compte de l'ensemble des variables étudiées (physiques, chimiques, climatiques). L'équation de rendement en racine RR (t/ha) $= 36,0 + 0,81\ P_2$ (mm) $+ 1,89$ calcaire p. $100 + \varepsilon$ explique 30 p. 100 des variations ($r = 0,55$), le premier terme P_2 (pluies de juillet-août) en expliquant à lui seul 16 p. 100 ($r = 0,41$) [1]. Afin de privilégier les constituants caractéristiques de la physique du sol, nous avons effectué une régression progressive tenant compte de ces variables et de l'état hydrique des sols.

L'équation :

$$RR = -32,9 + 4,26\ AW \text{ p. } 100 + 3,43\ Ca_S \text{ p. } 100 + \varepsilon$$

Ca_S = teneur en sable calcaire

AW = humidité du sous-sol en avril,

explique 27 p. 100 de la variation ($r = 0,53$).

Un troisième traitement en régression progressive sur la base des comportements physiques combinés aux humidités des sols a fourni l'équation suivante :

$$RR = -30,2 + 3,5\ AW \text{ p. } 100 + 0,56\ Aga \text{ p. } 100 + \varepsilon \qquad (r = 0,46)$$

où Aga = le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool.

Schéma explicatif du rendement

Le rendement en sucre étant le produit des rendements en racine par la teneur moyenne en sucre, nous représentons schématiquement sur la figure 5 le rendement en racines avec ses principales composantes et les coefficients de corrélation respectifs.

On constate que les deux composantes, LON et surtout CIR, expliquent très bien le poids moyen d'une betterave ; ce dernier par contre n'explique que 30 p. 100 ($r = 0,54$) du rendement en racine. Le faible effet est dû à l'influence de la densité de population (nombre de racines récoltées à l'ha) qui traduit assez bien l'intensité de la compétition intraspécifique. Cette variable est liée négativement avec la morpho-

---

[1] Le troisième terme était un indice de dispersion (lié à l'étalement de la levée) et le quatrième un facteur nutritionnel, le taux de nitrate du sol à la sortie de l'hiver, les deux termes étant englobés dans ε.

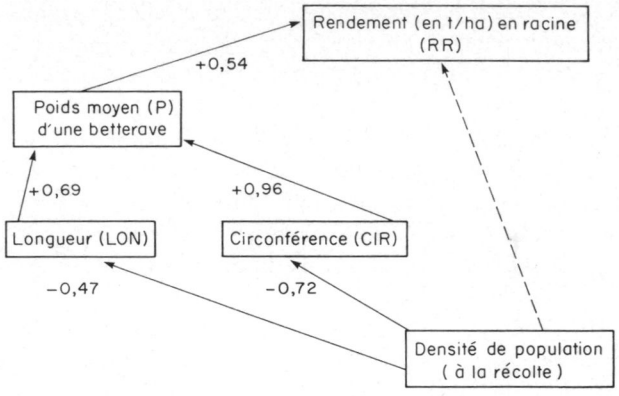


FIG. 5. — *Principales composantes du Rendement en racines et coefficients de corrélation respectifs. Main components in the root yield and respectif coefficients of correlation.*

logie et surtout avec la circonférence dont elle explique pratiquement 50 p. 100 de la variation.

Ces résultats traduisent les effets de compensation qui se produisent : lorsque la densité en betterave du peuplement diminue, la taille des betteraves et par conséquent leur poids moyen augmentent. Il s'en suit que, pour étudier l'influence des propriétés physiques du sol sur le développement des racines de betterave, il vaut mieux considérer les critères qui caractérisent la taille des betteraves : longueur, circonférence et la forme (racines fourchues).

3.2. — *Liaisons : morphologie des racines-physique du sol*

3.21. *Action sur la longueur* (LON).

— *La R. A. C.* (fig. 6*a*, *b*) montre que les variables explicatives de la longueur sont les mêmes que celles qui ont déterminé les rendements en racine (argile, mat. organique, calcaire, manganèse, humidité, agrégats alcool et profondeur de labour). De nouvelles variables sont intervenues, telles que la teneur en sable calcaire qui correspond aux fortes longueurs et la sensibilité au tassement $\Delta\lambda$. Si l'on considère les sols de limons (soixante-deux placettes), on constate que le rapport argile/limon est plus discriminant que l'argile pour expliquer les différences de longueur.

— *Le calcul des corrélations* (fig. 7*a*) confirme les liaisons et montre que les coefficients sont supérieurs pour le sous-ensemble « limons » (chiffres entre parenthèses). En matière d'éléments nutritifs du sol, seuls les nitrates des sous-sols en juillet interviennent positivement sur les longueurs (significatif au seuil de 5 p. 100). Quant à l'influence de la profondeur de labour sur LON, signalons que l'effet optimum a été obtenu avec un labour de 27 cm de profondeur.

— *Régression progressive* : en vue d'expliquer les variations de la longueur, nous avons pris en compte dans la régression progressive, trois types de variables : humidités du sous-sol, constituants physiques et comportements physiques.

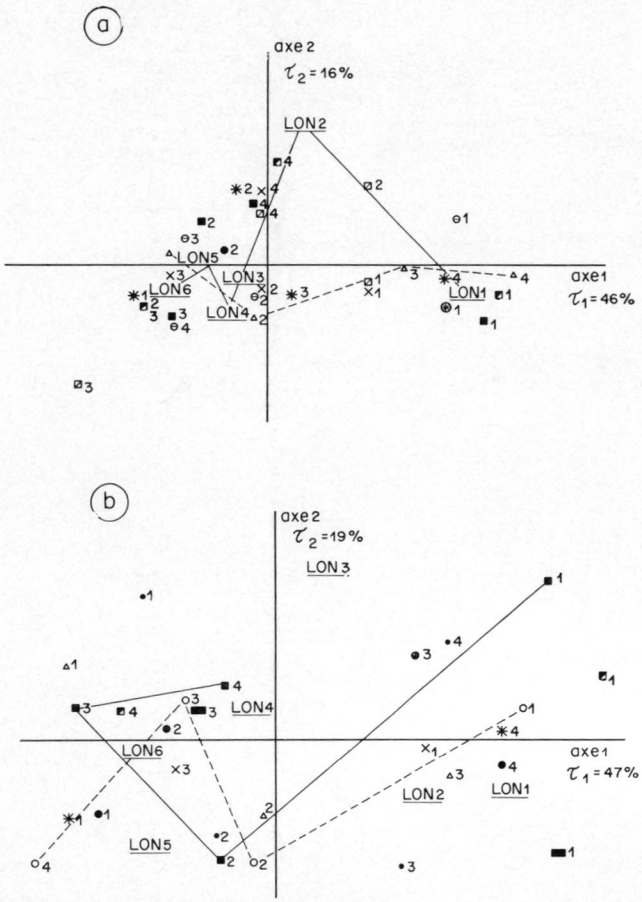


FIG. 6. — *R. A. C. sur les longueurs des racines : a) 82 données ; b) 62 données.*
A. C. R. on the root length : a) 82 data ; b) 62 data.

L'équation :

$$\text{Longueur LON} = 24{,}8 + 0{,}97\ Ca_s \text{ p. } 100 - 438\ \Delta\lambda + 0{,}49\ SW \text{ p. } 100 + \varepsilon$$

(Ca_s = teneur en sable calcaire,
$\Delta\lambda$ = sensibilité au tassement,
SW = humidité du sous-sol en septembre)
permet d'expliquer environ 50 p. 100 de la variation de la longueur ($r = 0{,}69$).

Cette équation confirme le rôle des trois types de variables qui sont dans l'ordre d'introduction dans la régression : un facteur constituant physique (Ca_s), un facteur lié au comportement ($\Delta\lambda$) et un facteur caractéristique des conditions hydriques (SW). Dans un second traitement statistique en régression progressive nous n'avons introduit que les variables humidité et constituants physiques ; dans ce cas l'équation n'est plus constituée que de deux termes, le premier restant le sable calcaire, le second étant le rapport argile/limon qui conditionne la battance. Néanmoins cette équation explique encore 41 p. 100 de la variation de la longueur.

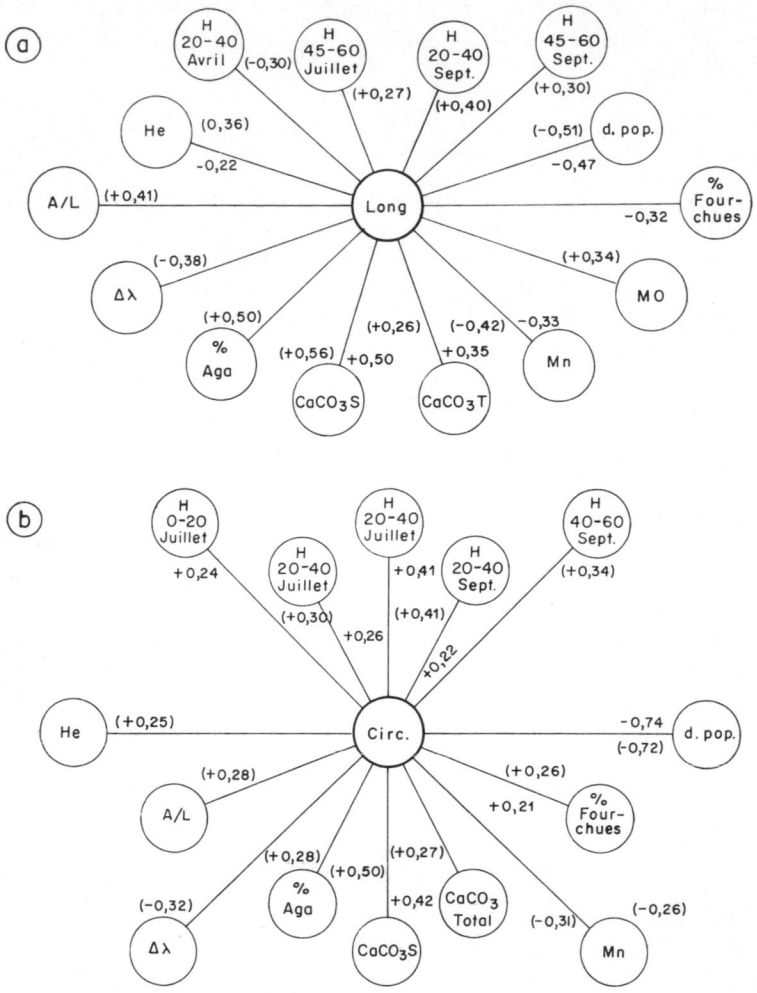


FIG. 7. — *Diagrammes des coefficients de corrélation des variables « physique du sol » liés à la longueur (fig. 7a) et à la circonférence (fig. 7b).*

+ 0,30 = r sur 82 données ;
(+ 0,30) = r sur 62 données.
Seuils de signification : à 5 p. 100 r = 0,22 (0,25) ;
à 1 p. 100 r = 0,28 (0,32).

Diagrams of the correlation coefficients of soil physical properties in relation to the length (fig. 7a) and the circonference (fig. 7b).

+ 0,30 = r from 82 data ; r (5 p. 100) = 0,22 (0,25) ;
(+ 0,30) = r from 62 data ; r (1 p. 100) = 0,28 (0,32).

3.22. *Action sur la circonférence* (CIR).

— R. A. C. (fig. 8*a*, *b*) : contrairement aux longueurs, le premier axe rend moins bien compte de la progression des faibles circonférences vers les fortes, il s'agit davantage d'un axe d'opposition entre les classes extrêmes. Notons que les faibles

circonférences sont déterminées par les mêmes variables que les faibles longueurs, les variables, état hydrique du sous-sol en juillet et septembre, étant plus discriminantes.

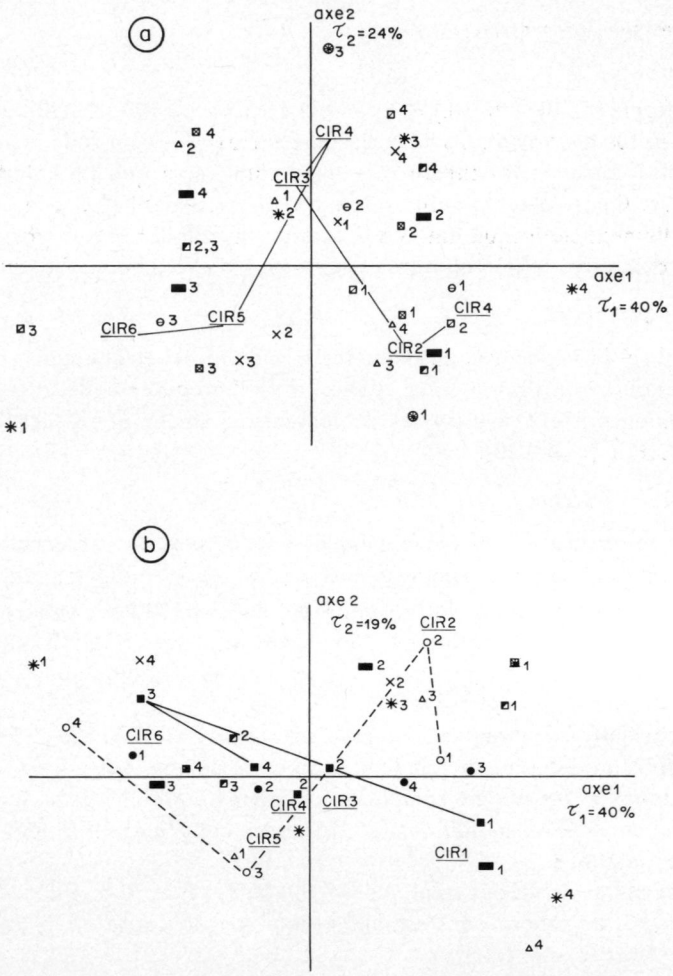


FIG. 8. — R. A. C. *sur les circonférences des racines : a) 82 données ; b) 62 données.*
« A. C. R. » on the root circumference : a) 82 data ; b) 62 data.

— Le graphique (fig. 7*b*) montre des corrélations linéaires très significatives avec la densité de population ($r = 0{,}74$), les sables calcaires ($r = 0{,}50$) et les réserves hydriques des sols en avril, juillet et septembre. Au niveau du sous-ensemble « limons » apparaissent de bonnes liaisons avec les variables « comportement physique » et les réserves hydriques sont liées aux circonférences d'une manière hautement significative ($r = 0{,}41$). Signalons aussi que les betteraves fourchues sont étroitement corrélées avec les circonférences, alors que les profondeurs de labour n'ont pas présenté d'effet significatif. Quant à l'état chimique des sols, on relève sur soixante-deux placettes une action positive des teneurs en nitrates du sous-sol en juillet et septembre (significative

au seuil de 1 p. 100) et des taux de phosphore et de potasse du sol (à la limite de la signification). Sur quatre-vingt-deux placettes par contre, l'effet du phosphore devient significatif.

— *Régression progressive.*

L'équation :

Circonférence CIR (en cm) $= 17{,}7 + 1{,}16\ Ca_s$ p. 100 $+ 0{,}90$ SW p. 100 $+ \varepsilon$ explique 36 p. 100 des variations de la circonférence ($r = 0{,}60$) ; elle montre également que les sables calcaires jouent un rôle important, ainsi que l'humidité du sous-sol en septembre. Quant à la variable sensibilité au tassement ($\Delta\lambda$) elle n'apparaît que dans un traitement statistique limité aux facteurs hydriques et aux variables caractéristiques du comportement, mais dans ce cas le taux d'explication n'est que de 22 p. 100.

3.23. *Petites betteraves.*

Le nombre de betteraves de diamètre $<$ à 5 cm est étroitement corrélé avec la densité de population (liaison à 1 p. 100) et avec l'irrégularité de la levée. Signalons que leur influence dépressive sur les rendements en racine et en sucre est à la limite de la signification ($r = 0{,}20$).

3.24. *Betteraves fourchues.*

Lors de la réalisation du profil cultural à la récolte, les observations effectuées sur les anomalies d'enracinement de la racine (tabl. 4) ont montré que :

— la matière organique était responsable de 23 p. 100 des betteraves fourchues (F) et de 17 p. 100 de l'ensemble des betteraves atteintes (F et f) ; dans ce cas, une mauvaise incorporation de fortes quantités de matière organique peu ou non compostée agit sur la forme des betteraves ;

— les cavités (discontinuité sol-air) ont été la cause de 22 p. 100 de F et de 16 p. 100 de F + f (importance accrue du fait de la sécheresse de l'année) ;

— les zones et les mottes compactes présentes dans l'horizon sont intervenues sur 25 p. 100 des F et 18 p. 100 des F + f (façons culturales effectuées en conditions critiques d'humidité) ;

— les semelles de labour expliquent 7 p. 100 des F et 20 p. 100 des F + f ;

— les fonds de labour sans semelle visible sont la cause de 11 p. 100 de F + f (uniquement sous forme de f) ;

— les éléments grossiers ne sont intervenus que sur 2 p. 100 de F, ce qui est normal compte tenu de l'importance des sols à éléments fins.

TABLEAU 4

Causes des déformations morphologiques des racines de betteraves (nombre de betteraves étudiées : 320)
Factors of the morphological deformations of sugar beet roots (320 *samples studied)*

	Mat. Org.	Cavité	Zones compactes	Semelle de labour	Fond de labour	Causes non expliquées
F	23 p. 100	22 p. 100	25 p. 100	7 p. 100	1 p. 100	19 p. 100
f.....	8 p. 100	6 p. 100	7 p. 100	44 p. 100	28 p. 100	7 p. 100
F + f	17 p. 100	16 p. 100	18 p. 100	21 p. 100	11 p. 100	14 p. 100

Enfin sur 19 p. 100 de F et 14 p. 100 de F + f, l'observation du profil cultural à la récolte n'a pas permis de déceler les causes des modifications morphologiques.

Sur les quatre-vingt-deux placettes, le coefficient de corrélation qui lie le pourcentage de betteraves fourchues (F + f) à la teneur en sucre est négatif et significatif au seuil de 5 p. 100 (les placettes dont le taux de betteraves fourchues était supérieur à 50 p. 100 ont donné un rendement en sucre inférieur à 8,5 t/ha). Mais la faible valeur du coefficient incite à considérer ce résultat avec prudence.

IV. — Discussion. Considérations agronomiques

Les travaux de Maertens (1964) montrent que le sol conditionne l'enracinement des plantes en raison même de la résistance qu'il leur oppose. Ils montrent également que les corrélations que l'on note dans les essais, traduisent généralement des interactions entre comportements physiques des sols et conditions nutritionnelles ; ainsi des sols sujets à des accidents physiques peuvent entraîner une alimentation insuffisante du fait d'une mauvaise exploitation racinaire. C'est dans cette optique que nous discutons les résultats afin d'éclairer, sous l'angle agronomique, les relations entre les constituants, les comportements des sols et les réponses de la betterave et des conditions climatiques de l'année.

4.1. — *Les effets des constituants physiques*

4.11. *Argile, matière organique.*

On connaît l'action du complexe colloïdal argilo-humique sur la dynamique des cations, la structure des sols et leurs réserves hydriques. Au niveau du sous-ensemble « limons » l'effet propre à l'argile apparaît clairement et on remarque que le rapport argile/limon rend davantage compte du phénomène de battance inhérent à ces types de texture. Quant à la matière organique, son action positive se manifeste aussi par l'intermédiaire de la teneur en phosphore et en potassium des sols. Par contre sur l'ensemble des quatre-vingt-deux placettes, il n'apparaît pas d'effets directs ; ceci s'explique par les faibles effectifs de certaines classes de texture, mais aussi par les difficultés d'incorporer de forts amendements organiques à des sols très argileux et par l'existence, dans quelques sols humifères, d'horizons plus ou moins gleyifiés (sol hydromorphes de Ried). Ces deux situations expliquent aussi les relations manganèse-morphologie par un effet d'hydromorphe (Rémy, 1977) qui conditionne l'oxygénation du sol et l'activité biologique du milieu.

4.12. *Calcaire.*

Nos résultats confirment ce que l'on sait de l'influence des sols calcaires sur les rendements en betteraves. Mais l'étude statistique permet de préciser cet effet bénéfique qui s'est manifesté plus nettement sur la longueur que sur la circonférence. Il était intéressant de savoir si cet effet était dû directement au calcaire en tant que carbonate ou s'il ne résultait pas d'une action liée à la taille des grains (effet de texture). L'interprétation statistique des résultats d'une double analyse granulométrique (avec et sans décarbonation préalable) a montré que l'action positive des *sables calcaires*

(sable fin et sable grossier) était plus forte que celle du calcaire total. L'effet du calcaire s'est également manifesté, par l'intermédiaire d'une liaison avec la matière organique ($r = 0{,}34$, seuil de 1 p. 100) et d'une corrélation étroite avec les teneurs en manganèse des sols ($r = -0{,}66$, seuil de 1 p. 100), en augmentant le taux de potassium des racines et en favorisant la nitrification dans le sol. Ce dernier effet peut s'expliquer par la liaison avec la matière organique et par l'effet propre du sable calcaire qui semble avoir amélioré l'aération des sols, favorisant ainsi la minéralisation de l'azote organique. Enfin, le sable calcaire est aussi apparu lié positivement avec le point de flétrissement ($pF = 4{,}2$) des limons. Ces résultats sont différents de ceux de Chiaverini et Gras (1976) qui ont constaté une influence négative du calcaire total.

4.13. *Manganèse EDTA.*

Le manganèse ne peut pas être considéré comme un constituant physique du sol ; nous l'avons pris en compte dans le cadre de l'enquête globale, parce qu'il semble être un bon indicateur de l'hydromorphie dans les sols (Rémy, 1974). L'étude statistique a montré que le manganèse était lié négativement (au seuil de 1 p. 100) aux constituants du sol : matière organique, argile, calcaire total et sable calcaire, qui conditionnent l'état structural de ces sols. Bien que l'on ne puisse pas parler d'hydromorphie en 1976, cette variable est apparue comme un facteur défavorable à la germination des betteraves et à la croissance des racines (surtout en longueur). Le manganèse peut donc être considéré comme « indicateur » de l'état des sols.

4.2. — *Les effets dus aux comportements des sols.*

Les trois constituants : argile, matière organique, calcaire, agissent aussi à travers une modification des comportements physiques des sols. Nous ne retenons que les plus discriminants ; le taux d'agrégats alcool (Aga) et la sensibilité au tassement ($\Delta\lambda$).

4.21. *Agrégats alcool (Aga).*

L'équation :

$$Aga = 0{,}21 + 1{,}2\ A \text{ p. } 100 + 1{,}58\ Ca_s \text{ p. } 100 + \varepsilon$$

calculée à partir d'une régression multiple sur les limons (soixante-deux stations), montre l'importance des taux d'argile et de sable calcaire, ces deux termes expliquant 35 p. 100 des variations de Aga ($r = 0{,}59$).

Nous avons constaté, qu'au-delà d'un certain seuil, l'effet bénéfique d'une meilleure stabilité structurale ne s'est plus fait sentir. Ce seuil s'explique par le fait que les très bonnes stabilités des agrégats semblent avoir eu comme corollaire, en 1976, un moins bon contact graines-sol, d'où une levée déficiente. Signalons aussi, qu'aux sols relativement humides en avril, correspondent les taux d'agrégats les plus faibles (liaison à 5 p. 100), et que cette humidité s'est répercutée d'une manière négative sur les longueurs, et d'une manière positive sur la densité de population par l'intermédiaire des pourcentages de levée. Néanmoins l'effet global de la bonne stabilité structurale (Aga) a été bénéfique à la croissance des racines en longueur (liaison à 1 p. 1000) et en épaisseur (liaison à 5 p. 100), du fait d'un milieu favorable à la minéralisation de

l'azote (liaison à 1 p. 1000), à la réduction des taux de manganèse (maintien d'un milieu aéré stable) et à la colonisation par les racines.

4.22. *Sensibilité au tassement* $\Delta\lambda$.

La mesure de la sensibilité au tassement est un test qui permet de prévoir le comportement du sol soumis aux interventions d'engins mécaniques.

L'équation calculée sur les limons :

$$\Delta\lambda = 0{,}228 - 0{,}003 \text{ A p. } 100 - 0{,}018 \text{ M. O. p. } 100 + \varepsilon \quad (r = 0{,}56)$$

montre l'importance des deux constituants du sol, argile et matière organique, qui expliquent 31 p. 100 de la variation de $\Delta\lambda$. Ces résultats confirment les observations de Faure (1971) et Faure et Fiès (1972).

La plus grande sensibilité au tassement des sols étudiés en laboratoire doit se traduire par des accidents structuraux sur le terrain. Nous avons pu vérifier cette assertion lors de l'examen de profils culturaux réalisés sur l'ensemble des quatre-vingt-deux stations. Nous avons trouvé une liaison significative ($\chi^2 = 5{,}33$) entre la sensibilité au tassement et la présence d'accidents structuraux (mottes compactes et semelles de labour).

La sensibilité au tassement conduit à des difficultés d'enracinement qui se manifestent à travers la morphologie des pivots (longueur, circonférence) et leurs anomalies (betteraves fourchues F et f). Il en résulte une colonisation partielle du sol par les racines pouvant entraîner une mauvaise utilisation des réserves nutritives du sol (Draycott *et al.*, 1970 ; Draycott, 1972). C'est ainsi que nous pouvons expliquer les teneurs en potassium des racines qui sont liées de façon positive aux caractères morphologiques des racines ($r = 0{,}31$, seuil à 5 p. 100).

Outre l'effet direct de la sensibilité au tassement sur l'enracinement, il faut signaler ses conséquences sur l'installation du peuplement de betteraves. Il existe une liaison positive entre $\Delta\lambda$ et le pourcentage de levée ($r = 0{,}56$, seuil à 5 p. 100). En effet, les horizons de surface des sols les plus secs en début de printemps contenaient encore, au moment du semis, plus de 50 p. 100 de la réserve utile RU, c'est-à-dire une humidité moyenne suffisante pour garantir une levée régulière, à condition de réaliser un bon contact sol-graine (effet positif du tassement sur la RU des sols ; Hillel, 1971). Ces faits mettent en évidence l'importance primordiale des façons culturales en 1976, année sèche.

4.3. — *Les effets des façons culturales*

Les semis effectués tout de suite après les reprises de labour, la dernière semaine de mars, ont donné de bons rendements en betteraves (fig. 4). L'évaporation étant très faible à cette période, on peut penser que les semences ont pu germer dans de bonnes conditions d'humidité qui ont encore été améliorées par les pluies de la première semaine d'avril.

Les binages trop répétés (fig. 4) ont été préjudiciables au rendement en racines en 1976, année caractérisée par un printemps sec. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les sols binés se dessèchent de façon plus importante en climat sec (Damagnez, 1973).

V. — Conclusions générales

On sait qu'en dehors de tout aspect nutritionnel, le sol conditionne l'enracinement en opposant une résistance mécanique à la plante. Ainsi l'état physique du substratum peut-il être considéré comme déterminant pour la croissance racinaire. L'étude détaillée des propriétés liées à la texture et à la structure des sols, qui conditionnent l'environnement mécanique et nutritif de la plante, nous a paru indispensable, en vue d'une bonne compréhension des interactions sol-plante.

L'aspect « physique du sol » qui fait l'objet de ce mémoire a été traité sur deux plans :

— sur le terrain, dans une optique de mise en valeur ou de diagnostic des phénomènes par rapport à un comportement de la plante, en caractérisant l'état morphologique du sol, compte tenu des travaux de préparation (profil cultural, densité apparente, zones de tassement) ;

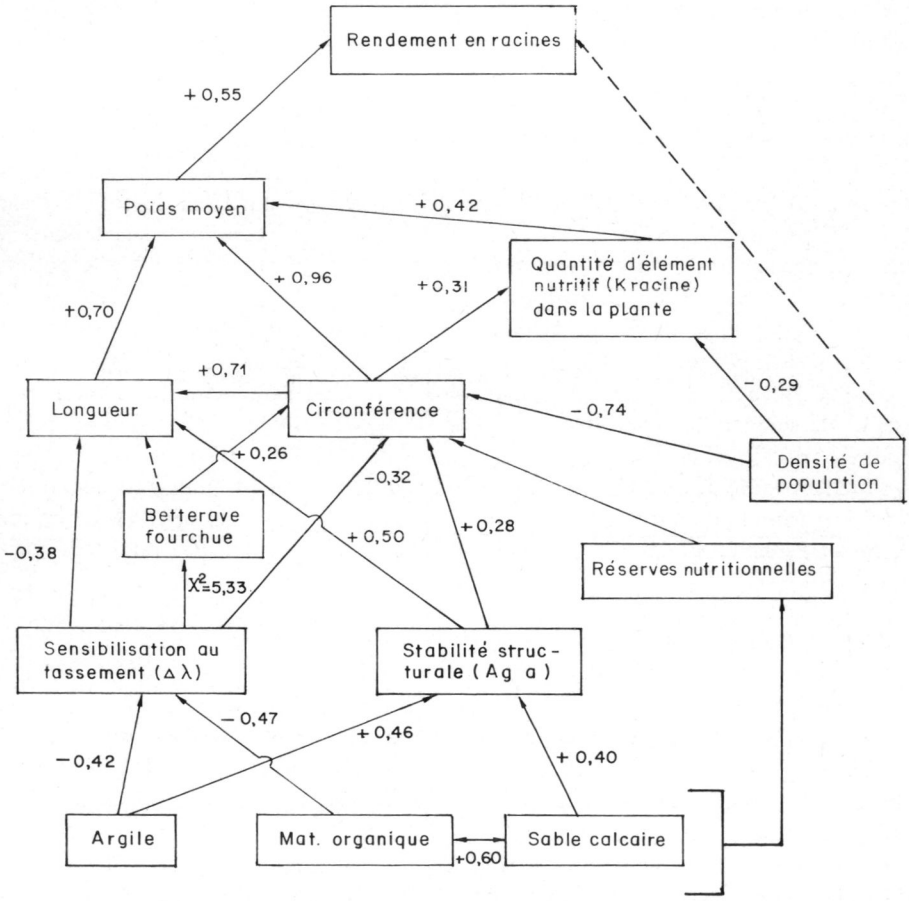


FIG. 9. — *Agrosystème betteravier.*

Agricultural system for sugar beet crop.

— sous un angle plus fondamental d'explication des phénomènes ou de compréhension des mécanismes, en discutant les interrelations : constituants physiques, comportements du sol, morphologie de la racine et rendement de la culture de betterave, compte tenu des conditions nutritionnelles et climatiques.

L'étude a montré que les rendements en racines des betteraves à sucre sont fortement dépendants des deux composantes morphologiques, longueur et circonférence, lesquelles ne réagissent pas aux mêmes facteurs. La croissance en longueur est essentiellement sous la dépendance des constituants physiques (argile, matière organique, calcaire) qui déterminent le comportement physique et mécanique des sols (stabilité structurale, sensibilité au tassement). Par contre, la croissance en épaisseur semble davantage liée aux facteurs nutritionnels, en synergie avec l'humidité du sol et compte tenu de la densité de population qui conditionne la compétition intraspécifique.

Une représentation schématique du système analysé est tentée dans la figure 9 en prévision d'une modélisation ultérieure du système betteravier.

Reçu pour publication en mai 1978.

Summary

Influence of the physical and mechanical properties of the soil on the sugar beet morphology and root yield

Various authors have studied the soil physical conditions in relation to its structure. From the soil-culture interaction, less inquieries about the effects of these conditions on the establishment of the cultivated plant are available. The sugar beet is a vegetal materiel which is very sensitive to the soil physical factors given its type of tap-rooting. These considerations have led the authors to study the relations existing between the establishment modalities of that plant and the soil physical and mechanical conditions.

The study of the influence of the soil physical and mechanical properties on the sugar beet morphology and root yield has been carried out within the frame work of a global survey on the sugar beet agrosystem. This survey has been realised in Alsace during the 1976 year in order to get a better knowledge of the factors and the circumstances which limit the sugar beet productivity and quality.

This study has been done on several levels :

— first on the ground, by the characterization of the soil morphology taking account of the preparation work (i.e. cultural profile, apparent density, compaction zones),

— then a far more basically understandable point of view of the mechanisms by debating the interrelations, physical components, soil conditions, morphology of the root and yield taking into account the climatic and the nutritionnal environment,

— on the methodological level, by the research of statistical models fitting this kind of qualitative and quantitative data.

The study has shown that the average weight of the sugar beet (thus the yield) depends on two morphological constituents : the length and the circumference which don't react to the same factors of the environment. On the one hand, the growth in length is essentially conditionned by the physical constituents and the soil mechanical conditions (structural stability, sensitivity to compaction), the growth in thickness, on the other hand, seems to be much more related to the nutritionnal factors in synergy with the moisture of the soil, taking into account the density of the population wich determines the intraspecific competition. We have besides pointed out a positive link between the quantity of potassium in the roots and the degree of facility to settle the soil.

The statistical exploitation of the various results has also allowed the authors to explain the mechanical conditions (sensitivity to compaction), the hydrodynamic characteristics (wilting point, equivalent moisture) and the structural stability (stable aggregates : benzene and alcohol) of the Aeolian silts of Alsace, starting from the relative importance of the different physical components amongst which the percentage of clay, of organic matter and of calcareous sand play an essential part.

The statistical methods used were the regression by the analysis of the correspondances and the progressive regression.

A schematic representation of the analysed system has been tried in view of a further modelisation.

Zusammenfassung

Einwirkung der physikalischen und mechanischen Bodeneigenschaften auf die Morphologie und den Ertrag der Zuckerrübenwurzeln

Die Einwirkung der physikalischen und mekanischen Bodeneigenschaften auf das Wurzelwachstum und den Ertrag der Zuckerrübe wurde im Rahmen einer Erhebung über den Zuckerrübenanbau im Elsass untersucht, unter besonderer Berücksichtigung der verschiedenen oekologischen Faktoren welche den Ertrag und die Qualität bedingen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Rübengewicht im Wesentlichen durch die zwei Hauptkomponenten Länge und Durchmesser bedingt wird. Das Längenwachstum ist hauptsächlich von dem mechanischen Bodenverhalten (Strukturfestigkeit, Verdichtungsempfindlichkeit) abhängig. Das Breitewachstum hingegen untersteht mehr dem Nährstoffangebot und den Wasserversorgungsmöglichkeiten, im Zusammenhang mit der Bestanddichte

Die angewandten statistischen Methoden erlaubten auch das mechanische Verhalten (Verdichtung), die hydrodynamischen Eigenschaften (Welkepunkt, Feuchtigkeitsäquivalent) und die Aggregatstabilität (Benzol, Aethylalkohol) der verschiedenen Löss- und Lehmböden aus dem Elsass mit den relativen Mengen an Bodenkomponenten (besonders Ton-Humus-und Kalksandgehalt) zu korrelieren.

Eine schematische Darstellung des analysierten Agrosystems wurde gegeben.

РЕЗЮМЕ

Влияние физических и механических свойств почвы на морфологию корней и урожайность сахарной свеклы.

Г. МЕТТОЕР, И. ТЮАЛЬ, Р. ХЕФЛИНЖЕ, А. П. КОНЕЗА, Р. ТРЕНДЕЛЬ.

В кадре общей анкеты по поводу сельскохозяйственной системы на базе культуры сахарной свеклы, проведенной в Эльзасе в 1976-м году для лучшего понимания факторов и условий ограничивающих продуктивность этого растения и качество полученной свеклы, изучалось влияние физических и механических свойств почвы на морфологию корней и на урожаи.

Изучение это показало что продукция корней сахарной свеклы находится главным образом в зависимости ото двух морфологических компонент — длинны и обхвата — реагирующих в свою очередь не на одни и те-же факторы. Рост в длинну зависит особенно от физических составных, определяющих физическое и механическое поведение почв ; утолщение-же корня больше связано с питательными факторами, влажностью почвы и плотностью посева.

Применявшиеся статистические методы заключались в анализе главной составной, регрессии при помощи анализа соответствий и прогрессивной регрессии.

В предвидении моделирования делана была попытка воспроизведения анализированной системы.

Références bibliographiques

BERTIER P., BOUROCHE J. M., 1975. *Analyse des données multidimensionnelles* (P. U. F.), 270 p.

BLAKE G. R., OGOEN D. B., ADAMS E. P., BOELTER D. H., 1960. Effect of soil compaction on development and yield of sugar beets. *J. Ann. Soc. Sug. Beet Technol.*, **11,** 236-242.

BLANCHET R., BOSC M., MAERTENS C., MARTY J. R., 1974. Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures, 3e partie. *Ann. agron.* **25** (6), 821-836.

CHIAVERINI J. et GRAS R., 1976. Influence de la constitution de sols calcaires du Sud-Est de la France sur leurs propriétés hydriques et structurales. *Science sol* (4), 227-239.

CONESA A. P., ROUX M., BAILLON P., HADJ-MILOUD D., MAGINIEAU C., LEMAIRE G., 1975. Etude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut Chéliff. I — Analyse factorielle des correspondances. *Ann. agron.*, **26** (6), 709-740.

DAMAGNEZ J., 1973. Le climat méditéranéen et les travaux agricoles. *Bull. techn. Inform.*, **278,** 171-176.

DRAYCOTT A. P., 1972. *Sugar beet nutrition.* Applied Science Pub. London 250 p.

DRAYCOTT A. P., HULL R., MESSEM A. B., WEBB D. J., 1970. Effect of soil compaction on yields and fertiliser requirement of sugar beet. *J. Agric. Scienc. Lamb.*, **75,** 533-537.

FAURE A., 1971. Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. *Ann. agron.*, **22** (5) 487-513.

FAURE A., FIÈS J. C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. Agron.*, **23** (3), 317-332.

GRAS R., DEFFONTAINES P. L., MARIN LAFLÈCHE A., 1971. Contribution à l'étude de la culture de la betterave à sucre sur les sols légers du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne. *Ann. agron.*, **22** (5), 537-584.

HAEFLINGER R., CONESA A., METTAUER H., TRENDEL R., TUAL Y., 1977. Etude multidimensionnelle de l'influence des facteurs édaphiques sur les rendements en sucre et la qualité de betterave en Alsace. *Premières journées internationales analyse des données et informatique*. 7-9 septembre 1977, Versailles. Colloques I. R. I. A., vol. II, 629-638.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural*, Masson Paris, 320 p.

HILLEL D., 1971. *Soil and Water* Acd. Press. 240 p.

KHEYRABI et MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

MAERTENS C., 1964. La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. agron.*, **15** (5), 539-554.

MAERTENS C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Science Sol* 2, 1-11.

MONNIER G., DEFALQUE J., 1963. Problèmes posés par la préparation du sol pour la culture de la betterave à sucre en Champagne. *C. R. Acad. agric. Fr.*, 1008-1017.

RÉMY J. C., 1971. Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. *Ann. agron.*, **22** (9), 267-290.

RÉMY J. C., MARIN LAFLÈCHE A., 1974. Résultats d'une enquête sur les causes de mauvais départ de végétation sur betterave en sol de limon. *Science Sol*, 1, 61-66.

RUSSEL E. W., 1976. The effects of very deep ploughing and subsoiling on crop yields. *J. Agric. Sci. Camb.*, **48**, 129-144.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 169-176.

Composition en acides organiques des racines de plantes soumises à une période d'excès d'eau à différents stades de végétation

C. DUTHION

avec la collaboration technique de Josiane MORTIER

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
17, *rue Sully* 21034 *Dijon Cedex*

Résumé

Cinq espèces ont été soumises, à différents moments de leur croissance, à une période d'excès d'eau. L'analyse de leurs racines a été faite comparativement à celle des racines de plantes de même espèce cultivées en milieu ressuyé. Pour le Maïs, la Moutarde, le Tabac, le Tournesol, on observe à tous les stades :

— une diminution de l'acidité totale et de l'acidité minérale dans les extraits hydroalcooliques des racines, une augmentation des teneurs en succinate ;

— une diminution des teneurs en malate chez la Moutarde et le Tabac, espèces les plus sensibles à l'excès d'eau, une augmentation chez le Maïs et le Tournesol, espèces relativement plus tolérantes. Sur l'observation de ces différences métaboliques est fondé un schéma d'interprétation de la tolérance à l'ennoyage présenté dans un mémoire précédent.

Le Riz montre dans l'ensemble des variations des teneurs en acides beaucoup plus faibles que les autres espèces. Il est donc vraisemblable qu'un autre mécanisme d'adaptation est prédominant.

Introduction

La limitation des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, qui résulte de la présence d'eau en excès, entraîne une diminution rapide des teneurs en oxygène dans le milieu racinaire. L'activité métabolique des plantes est par suite profondément troublée. On observe, en particulier, des variations, parfois très importantes, des teneurs en acides organiques des racines ; nous avons pu le montrer, dans un mémoire précédent (Duthion, 1976), chez douze espèces cultivées, soumises à une période expérimentale d'ennoyage.

Ainsi que l'avaient déjà noté Crawford et Tyler (1969) pour des espèces spontanées de différents habitats, on remarque une certaine convergence entre le comportement de l'espèce et l'évolution de la teneur en acide malique de ses racines, au cours de l'ennoyage : McManmon et Crawford (1971) en ont conclu à une possibilité d'adaptation métabolique à l'excès d'eau, dont ils ont donné le schéma théorique.

Les résultats présentés dans l'article cité en référence (Duthion, 1976) ont été obtenus après un seul traitement excès d'eau, appliqué au début de la floraison,

époque pendant laquelle l'activité racinaire est considérée comme maximale par de nombreux auteurs. Avant d'aborder l'étude proprement dite des réactions mises en jeu, il importe donc de confirmer, à différents âges physiologiques, le comportement à l'ennoyage et les réponses métaboliques globales des plantes.

Méthodes et techniques

1. — *Les espèces*

L'étude a porté sur deux des espèces les plus sensibles, Moutarde noire (*Sinapis nigra*) et Tabac (*Nicotiana tabacum* L., cv. Xanthi n. c.), et deux des espèces relativement tolérantes à l'excès d'eau, Maïs (*Zea mays* L., cv. LG 11) et Tournesol (*Helianthus annuus* L., cv Issanka), parmi celles qui ont été utilisées précédemment. Le Riz (*Oryza savita* L., cv. Cigalon), espèce adaptée aux terrains submergés, a également été cultivé afin de compléter les comparaisons.

2. — *Cultures et traitements*

Les cultures et traitements sont réalisés dans les mêmes conditions que précédemment (Duthion, 1976). Le renouvellement de la solution d'ennoyage, destiné à en limiter quelques effets secondaires, est effectué tous les trois jours ; après drainage de la solution en place, les bacs de culture sont remplis, jusqu'au niveau supérieur du sable, avec de l'eau permutée, elle-même rapidement éliminée, puis de la solution nutritive diluée (dilution telle que les apports d'éléments nutritifs sont identiques sur une période de 3 jours pour les plantes en milieu ressuyé et pour les plantes en excès d'eau), dans laquelle un courant d'azote a préalablement barboté pendant 30 mn environ.

Les traitements excès d'eau ont été appliqués à trois âges physiologiques précisés ci-dessous pour chacune des espèces :

	Maïs	Moutarde	Riz	Tabac	Tournesol
Stade jeune	Trois feuilles	rosette	début tallage (1re talle principale)	six à huit feuilles	quatre feuilles
Stade « adulte » ..	émergence panicule	préfloraison	émergence panicule	préfloraison	capitule ∅ 2 à 3 cm
Stade sénescent...	grain laiteux-pateux	maturation siliques	panicule incliné	bouquet fané	

Le Tournesol n'a pu être cultivé assez longtemps pour être soumis au traitement excès d'eau au troisième stade prévu.

3. — *Prélèvements et analyses*

La technique de prélèvement des échantillons de racines, l'analyse et l'identification des acides organiques non cétoniques ont été décrites dans une publication précédente (Duthion, 1976).

Les prélèvements sont faits aux temps 0, 3, 6, 12 et 24 jours après le début de l'ennoyage ; ils concernent, à chaque fois, un bac témoin et un bac traitement. Chaque échantillon prélevé pour analyses est en fait un échantillon moyen correspondant à six à douze plantes selon l'espèce et le stade. Les zones lésées des systèmes racinaires sont éliminées.

Résultats

1. — *Comportement des espèces.*

Les symptômes foliaires et racinaires liés au traitement (flétrissement et jaunissement des parties aériennes, nécroses des racines), la rapidité de leur apparition et de leur aggravation, et les variations comparées du poids des plantes au cours de la période d'excès d'eau (sauf pour le stade le plus tardif où elles n'ont plus de signification) constituent les éléments d'appréciation du comportement des espèces.

Dans les conditions de l'essai, on constate que le classement relatif des espèces selon leur tolérance à l'excès d'eau est identique aux trois stades, même s'il y a atténuation apparente de ses effets au stade sénescent, due vraisemblablement à une activité racinaire beaucoup moindre.

Moutarde et Tabac sont toujours très peu tolérants. Les symptômes apparaissent et s'étendent rapidement, l'augmentation de poids est faible comparée à celle des plantes témoins (inférieur à 40 p. 100 de celle des témoins après 12 jours d'ennoyage, en matière sèche). L'importance des dégâts subis par les systèmes racinaires n'a permis aucun prélèvement pour analyses au-delà de 6 ou 12 jours de traitement.

Maïs et Tournesol sont, par contre, davantage tolérants : symptômes de souffrance plus modérés, augmentation de poids, en matière sèche, de l'ordre de 65 à 70 p. 100 de celle des plantes témoins au bout de 12 jours d'excès d'eau. Chez ces deux espèces et contrairement à la Moutarde et au Tabac chez lesquels elles sont peu abondantes, des racines d'un type nouveau, blanches, courtes, épaisses, sont émises assez rapidement à partir du bas des tiges ou, pour le Maïs, à partir des racines d'ancrage.

On n'observe chez le *Riz* aucune différence de morphologie ou d'évolution du poids entre plantes cultivées sur milieu ressuyé et plantes ennoyées, lorsque l'excès d'eau est appliqué aux stades adulte et sénescent. Au stade le plus jeune, une période d'adaptation paraît nécessaire, qui se manifeste par un jaunissement des parties aériennes entre le sixième et le douzième jour, alors que la plante récupère totalement par la suite. Aucune racine d'un type différent de celui du système racinaire initial n'est émise pendant le traitement.

2. — *Acidités totale, minérale et organique, teneurs en acides organiques non cétoniques des racines.*

Parmi les acides organiques non cétoniques déterminés, seuls sont représentés dans la figure 2, les succinate, malate, citrate et isocitrate, dont les variations, sauf exception, concourent pour l'essentiel à celle de l'acidité organique dosée.

Une courte période d'excès d'eau provoque, sauf chez le Riz au stade le plus jeune, une diminution de l'acidité totale et de l'acidité minérale dans les extraits hydroalcoo-

iiques des racines (fig. 1). L'acidité organique décroît chez la Moutarde (excepté au stade rosette) et le Tabac, augmente chez le Maïs et le Tournesol, alors qu'elle varie peu chez le Riz.

On observe d'ailleurs, chez cette dernière espèce, que les variations des teneurs en acides organiques non cétoniques induites par l'excès d'eau sont toujours faibles et peu

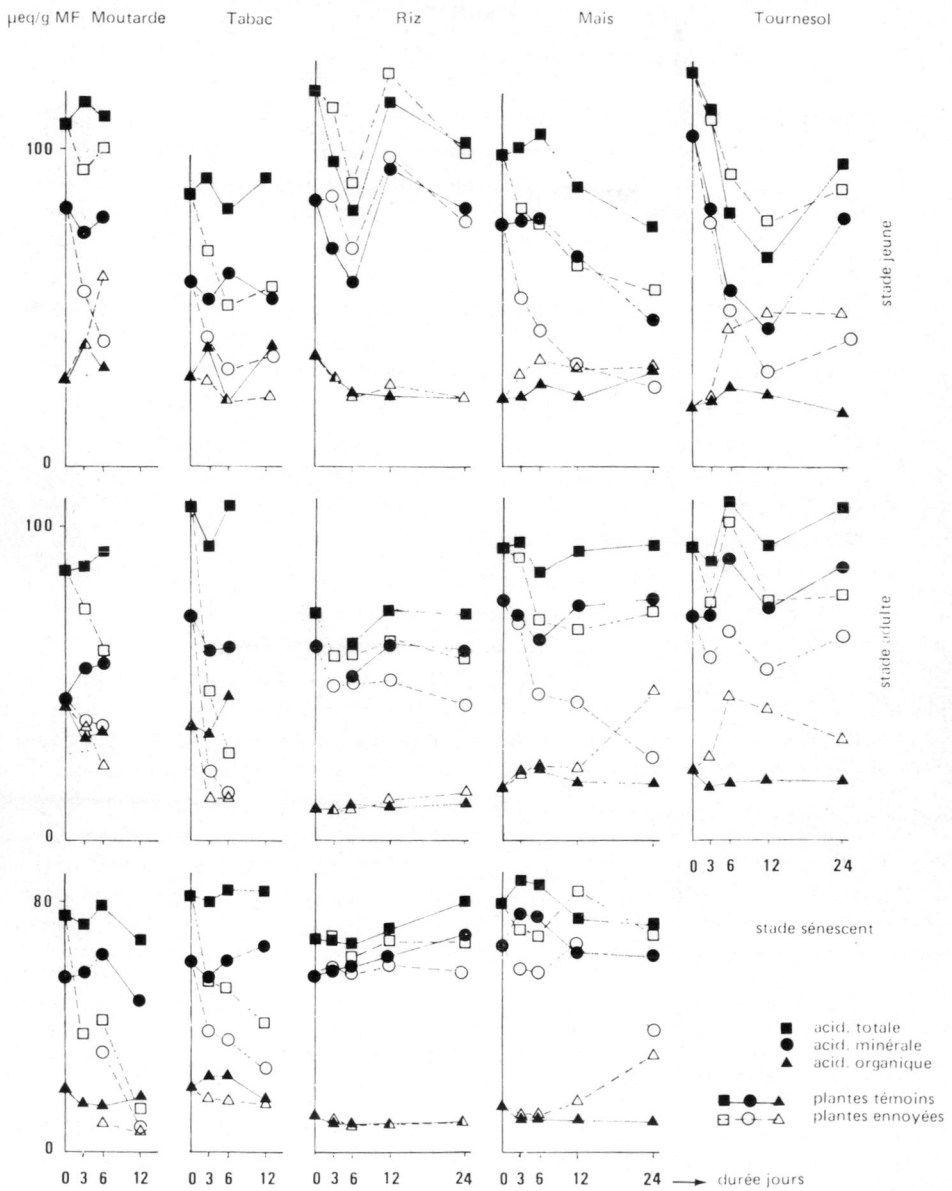


FIG. 1. — *Variation des acidités totale, minérale et organique dans les racines* (µeq/g de *matière fraîche*).
Variation of total, mineral and organic acidity in the roots (µeq/g *of fresh matter*).

significatives (fig. 2). Pour les autres espèces on note des augmentations parfois importantes des teneurs en succinate ; les teneurs en malate diminuent chez la Moutarde et le Tabac, augmentent chez le Maïs et le Tournesol, celles en citrate et isocitrate évoluent de façon assez différente d'un stade à l'autre chez la Moutarde et le Tabac, s'accroissent chez le Maïs et le Tournesol.

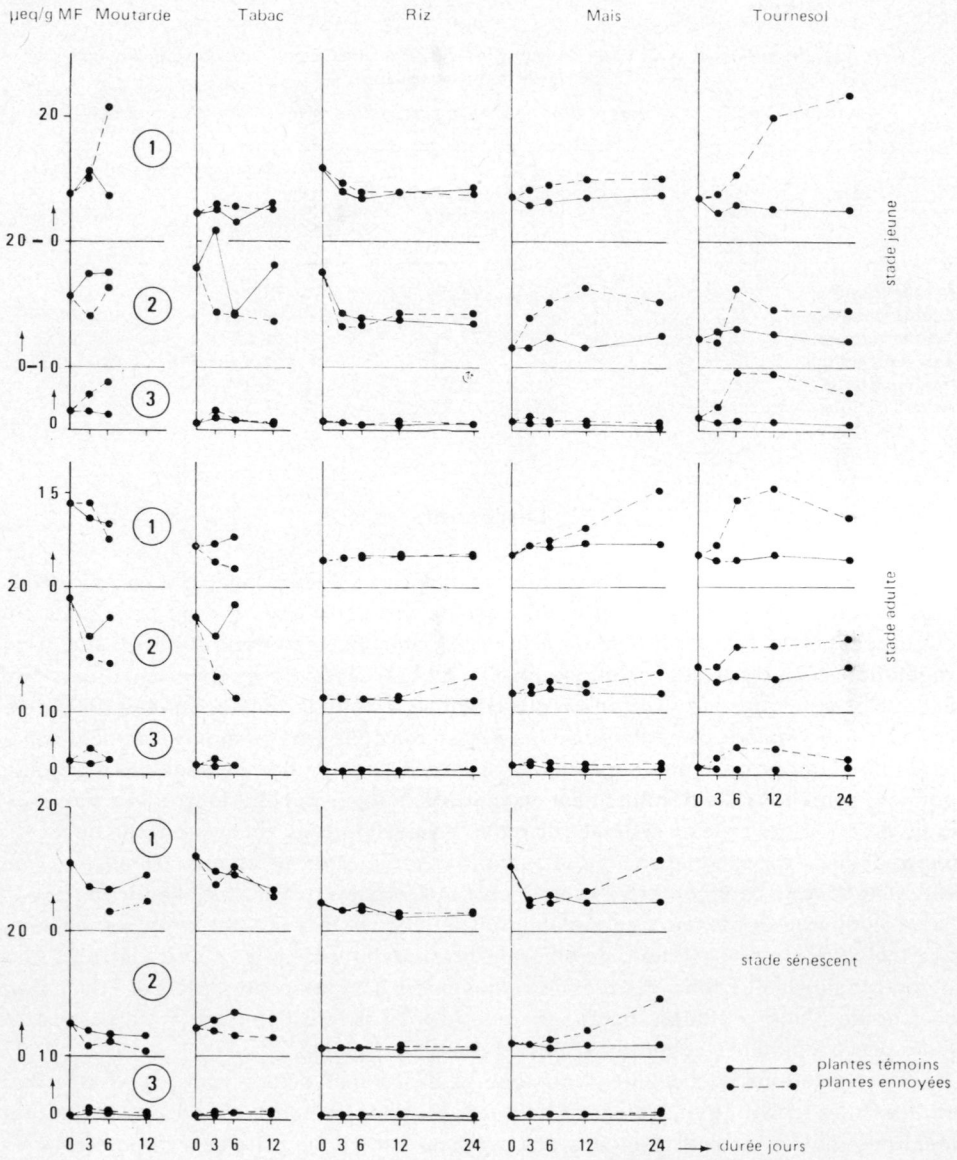


FIG. 2. — *Variation des teneurs en acides dans les racines* (µeq/g *de matière fraîche*)
① : *citrate et isocitrate* ; ② : *malate* ; ③ : *succinate*
Variation of acid contents in the roots (µeq/g *of fresh matter*)
① : *citrate and isocitrate* ; ② : *malate* ; ③ : *succinate.*

Le Maïs, au stade émergence du panicule mâle, a émis, en grand nombre, des racines nouvelles qui ont pu être prélevées séparément après 24 jours de traitement. Leur analyse, comparée à celles des racines des plantes témoins et du système racinaire ancien des plantes ennoyées, est donnée dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Analyses des racines de maïs après 24 jours d'ennoyage au stade émergence du panicule mâle (µeq/g de matière fraîche)

Corn roots analysis after 24 days of flooding at emergency of the male panicle (µeq/g of F. M.)

	Racines plantes témoins	Racines plantes ennoyées	
		anciennes	nouvellement émises
Acidité totale	94,7	73,5	63,7
Acidité organique	17,5	47,4	57,5
Acidité minérale	77,2	26,1	6,2
Acide succinique	0,8	1,4	1,0
Acide malique	3,0	6,2	6,6
Acides citrique + isocitrique	6,9	15,5	17,1

Discussion

L'acidité des extraits hydroalcooliques des racines et leurs teneurs en acides organiques non cétoniques, au cours d'une période d'excès d'eau, varient pour chacune des espèces Maïs, Moutarde, Tabac, Tournesol, dans le même sens aux trois stades de végétation. L'ampleur des variations que l'on a observées diffère cependant d'un stade à l'autre, pour plusieurs raisons vraisemblables : activité métabolique de la plante variable avec son âge physiologique, besoins en oxygène plus ou moins aisément satisfaits selon l'importance de l'exploration racinaire dans un bac de végétation de taille donnée, conditions d'environnement (luminosité, température). Malgré leur morphologie différente de celle du système racinaire préexistant, les racines émises après un temps d'ennoyage sembleraient, tout au moins chez le Maïs, se comporter au point de vue métabolique de façon assez comparable aux racines qui ont subi l'ennoyage.

L'évolution des teneurs en malate dans les racines des plantes ennoyées permet, aux trois stades de végétation, de différencier analytiquement les plantes les plus sensibles, Moutarde et Tabac, des plantes relativement plus tolérantes, Maïs et Tournesol. Le schéma d'interprétation métabolique de la tolérance à l'ennoyage qui a été présenté précédemment (Duthion, 1976) n'est donc pas infirmé.

Les variations de l'acidité organique et des divers acides sont par contre très limitées chez le Riz. Les mécanismes invoqués plus haut n'interviennent donc certainement pas seuls et ne sont peut-être pas prédominants pour cette espèce particulièrement adaptée. La présence d'espaces lacunaires ou aérenchymes dans les parties aériennes et les racines du riz permet, ainsi que divers auteurs l'ont reconnu (Jensen *et al.*, 1967 par exemple), un transfert interne d'oxygène. Yamasaki et Saeki (1976) après avoir montré que le flux interne depuis les parties aériennes jusqu'aux racines

augmente lorsqu'il y a appauvrissement en oxygène du milieu racinaire, constatent cependant l'insuffisance de ce mécanisme pour assurer la croissance des racines dès que le riz atteint une certaine taille (50 à 60 jours après la germination).

Conclusion

Les résultats qui viennent d'être présentés montrent que l'acidité dans les extraits hydroalcooliques des racines des espèces étudiées et leurs teneurs globales en acides organiques non cétoniques varient dans le même sens, mais avec des ampleurs différentes, après chacune des périodes d'ennoyage imposées ; celles-ci correspondent à trois stades de végétation. Le schéma d'interprétation métabolique de l'adaptation à l'ennoyage, donné précédemment, reste donc vraisemblable ; il doit maintenant être confirmé par l'étude proprement dite des réactions mises en jeu. Dans le cas du Riz cependant, les très faibles variations de teneurs que l'on observe pourraient être dues à la prédominance d'un autre mécanisme d'adaptation, à caractère morphologique.

Reçu pour publication en mai 1978.

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Jolivet (Laboratoire du Métabolisme intermédiaire et de Nutrition minérale, Département de Physiologie végétale INRA Versailles), qui a bien voulu nous aider de ses conseils. Ses critiques, au cours de la rédaction du présent mémoire, ainsi que celles de M. Pradet (Laboratoire de Physiologie végétale, INRA Bordeaux) nous ont été précieuses.

Summary

Organic acid composition of plant roots subjected to a period of water excess at different vegetative stages

Five species have been subjected to a period of water excess at different growth stages. The analysis of their roots was made in comparison with that of roots of plants belonging to the same species cultivated on dried medium. In maize, mustard, tobacco and sun-flower we observed at any stage :

— a decrease in the total and mineral acidity in the hydroalcoholic extracts of the roots, an increase of the contents in succinate ;

— a decrease in the malate contents in mustard and tobacco which are the species the most susceptible to water excess, an increase in maize and sun-flower which are relatively more tolerant species. A scheme to interpret the tolerance to water excess described in a previous paper is based on the observation of these metabolic differences.

Rice shows much lower variations of the acid contents than the other species. It is therefore possible that another adaptation mechanism is predominant.

Zusammenfassung

Zusammensetzung an organischen Säuren von zu verschiedenen Vegetationsstufen einem Wasserüberschuss unterworfenen Pflanzenwurzeln

Die Schwankungen des Gehaltes an nicht ketonischen organischen Säuren der Wurzel von fünf angebauten Arten wurden zu verschiedenen Vegetationsstufen während einer Wasserüberschussperiode verfolgt. Für eine gegebene Art erfolgen diese Schwankungen immer in derselben Richtung, wenn auch mit verschiedenem Umfang. Die bei Mais, Senf, Tabak und Sonnenblume erzielten Ergebnisse bestätigen die früheren Beobachtungen. Der Reis ist durch die sehr schwachen Änderungen des Gehaltes an organischen Säuren seiner Wurzel gekennzeichnet.

РЕЗЮМЕ

Состав органических кислот корней растений переживших период излишка влаги в течении различных вегетативных стадий.

К. ДЮТИОН.

В корнях пяти культивируемых растительных видов, в различные периоды их роста, исследовались изменения содержания не кетоновых органических кислот. Изменения зти имели всегда одно и то-же направление, для всех растений одного и того-же вида, несмотря на большие различия амплитуды изменений. Результаты полученные на кукурузе, горчице, табаке и подсолнечнике подтверждают прежние наблюдения. Рис, характеризуется слабым содержанием органических кислот в корнях.

Références bibliographiques

CRAWFORD R. M. M., TYLER P. D., 1968. Organic acid metabolism in relation to flooding tolerance in roots. *J. Ecol.*, **57,** 235-244.

DUTHION C., 1976. Variations des teneurs en acides organiques de racines de plantes soumises à un excès d'eau. *Ann. agron.*, **27,** 207-220.

JENSEN C. R., STOLZY L. H., LETEY J., 1967. Tracer studies of oxygen diffusion through roots of barley, corn and rice. *Soil Sci.*, **103,** 23-29.

MAC MANMON M., CRAWFORD R. M. M., 1971. A metabolic theory of flooding tolerance : the significance of enzyme distribution and behaviour. *New Phytol.*, **70,** 299-306.

YAMASAKI S., SAEKI T., 1976. Oxygen supply from shoots to roots relative to the total oxygen consumption in rice roots. *Bot Mag.* (Tokyo), **89,** 309-319 (in *Biol. Abstr.*, **61,** 5).

Ann. agron., 1978, **29** (2), 177-192.

Répartition des éléments fertilisants dans les sols de serres florales du midi de la France (œillets et rosiers)

A. MORISOT

avec la collaboration technique de Carmelle GIACCO, C. MONTANARO et J.-P. TOURNIER

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale I. N. R. A.,
45, *boulevard du Cap*, 06602 *Antibes*

Résumé

La répartition des éléments fertilisants a été étudiée sur environ 2 m de profondeur dans les sols de dix-neuf serres d'œillets et treize de rosiers à fleurs coupées. L'enrichissement de la couche superficielle travaillée est très important (moyenne des teneurs dans les vingt premiers centimètres : N total = 2,5 p. 1 000 ; P_2O_5 assimilable Truog = 0,7 p. 1 000 ; K_2O échangeable = 0,9 p. 1 000). Les teneurs en Nt et P_2O_5 diminuent brusquement sous la zone labourée et deviennent faibles en sous-sol. L'azote nitrique est extrêmement mobile. On observe deux types d'entraînements :

1) En profondeur par l'eau de drainage même en l'absence de lessivage volontaire du sol : 2/3 des profils contiennent l'équivalent de 200 à 2 200 kg $N\text{-}NO_3$/ha au-delà de 1 m de profondeur.

L'absence de nitrates en profondeur est exceptionnelle.

2) En surface vers les allées qui ne sont pas arrosées (l'accumulation due à l'évaporation atteint couramment l'équivalent de 1 000 kg $N\text{-}NO_3$/ha dans les dix premiers centimètres).

Le potassium est soumis aux mêmes entraînements, mais beaucoup moins intensément.

Ces observations incitent à mieux ajuster les amendements organiques et la fertilisation aux besoins des plantes. Elles permettent aussi d'améliorer les méthodes de prélèvements de terre pour analyse.

Introduction

Pour l'agriculture d'aujourd'hui la fertilisation correcte est celle qui permet une production végétale optimale tout en minimisant les fuites d'éléments fertilisants hors de la zone cultivée. Il s'agit d'éviter tout excès de fertilisation qui augmente inutilement les coûts de production et d'empêcher une dégradation locale de notre environnement, notamment de la qualité des eaux souterraines. Hauret (1973) et l'OCDE (1973), parmi bien d'autres, ont tenté d'évaluer l'importance de ces pertes d'engrais pour l'agriculture européenne. Gachon (1974) et Hébert (1974) ont proposé des améliorations pour les techniques culturales de l'agriculture de plein champ.

Paradoxalement, ce souci paraît absent d'une des formes les plus intensives de la production végétale : la culture florale sous serre. Les observations sur la composition chimique des sols ne dépassent pas la couche superficielle travaillée, et leur seul objectif est d'assurer à la plante une nutrition minérale satisfaisante (Gouny et Cornillon,

1969 ; Blanc, 1975 ; Moulinier, 1975 ; Dartigues et Morlat, 1976). Deux publications étrangères étudient la répartition des éléments fertilisants dans des sols sous serres irrigués par goutte à goutte, mais uniquement pour améliorer les techniques de prélèvement de terre pour analyse de contrôle : Au Danemark, Dalbro et Dorph Petersen (1976) s'intéressent aux cinquante premiers centimètres du sol. En Angleterre, Little et Yuen (1973) comparent les quinze premiers centimètres de vingt-deux serres dont quatre d'œillets et quatre de chrysanthèmes.

Nisen (1972) étudie la pollution des sols sous abris, sous l'aspect « fatigue des sols » et diminution de la production végétale. Il dénonce notamment l'accumulation

TABLEAU 1

Comparaison entre les apports d'éléments fertilisants et les exportations par les récoltes
(en g/m²/an *ou* 10 kg/ha/an)

Comparison between amount of nutrients supplied in fertilizers and uptake by crops
(g/m²/year *or* 10 kg/ha/year)

	Œillet Carnation			
	Apports		Exportations	Solde
	fumier (sur 2 ans) 10 kg/m² ou 30 kg/m²	fertirrigation		avec fumier 10 kg/m² ou 30 kg/m²
N	40 ou 120	170	— 115	+ 95 ou + 175
P_2O_5	10 ou 30	32	— 25	+ 17 ou + 37
K_2O	40 ou 120	180	— 110	+ 110 ou + 190

	Rose (1er cas) Rose (1st case)			
	Apports		Exportations	Solde
	fumier (sur 5 ans) 25 kg/m² ou 100 kg/m²	fertirrigation		avec fumier 25 kg/m² ou 100 kg/m²
N	40 ou 160	125	— 100	+ 65 ou + 185
P_2O_5	10 ou 40	45	— 25	+ 30 ou + 60
K_2O	40 ou 160	115	— 100	+ 55 ou + 175

	Rose (2e cas) Rose (2nd case)			
	Apports		Exportations	Solde
	fumier ou équivalent 20 kg/m² chaque année	fertirrigation		
N	160	60	— 100	+ 120
P_2O_5	40	48	— 25	+ 63
K_2O	160	40	— 100	+ 100

d'éléments minéraux, mais ne se préoccupe pas de leur devenir après qu'un lessivage les ait entraînés en profondeur.

Pourtant, en relation avec les apports d'amendements organiques et d'engrais qui représentent à surface égale le décuple des apports courants en culture de plein champ (tabl. 1), trois traits de la pratique horticole concourent à accroître singulièrement les risques d'entraînement :

— le bilan global des principaux éléments fertilisants est en général très excédentaire. Le tableau 1 tente de dresser un tel bilan d'après des données de Blanc (1967), Moulinier et Montarone (1976) et Goujon (1977). Cet excès provient aussi bien des amendements organiques que des fumures minérales. Nisen (1972) insiste d'ailleurs sur les inconvénients des apports organiques exagérés.

— En deuxième lieu, la fumure d'entretien est une irrigation fertilisante (Gouny, 1975 ; Moulinier, 1975). Les engrais sont apportés sous forme de sels dissous, donc susceptibles d'être immédiatement entraînés s'il y a un excès d'eau.

— Enfin, on pratique parfois un lessivage du sol pour lutter contre un excès de salinité. Or, sauf remontée d'eau saumâtre qui ne concerne que des zones très réduites (près d'Hyères, par exemple), cette salinité est due à une accumulation de nitrates.

Les surfaces consacrées à ce type d'agriculture sont évidemment minimes à l'échelle de la France. L'œillet et la rose représentent 70 p. 100 des fleurs coupées et sont produits surtout dans les deux départements des Alpes-Maritimes (250 ha) et du Var (180 ha). Le regroupement des serres dans quelques petites régions amène toutefois à s'interroger sur leur impact local. On trouvera au tableau 2 quelques statistiques sur les serres florales.

TABLEAU 2

Statistiques des cultures florales sous serres en 1974 *et* 1975
(*d'après le Service Régional de Statistiques Agricoles* 1975 *et* 1976)

Statistics on floral crops under greenhouses in 1974 *and* 1975
(*from the Regional Service of Agricultural Statistics*, 1975 *and* 1976)

Serres florales de Provence, Côte d'Azur, Corse en 1975

Floral greenhouses of Provence, Riviera, Corsica in 1975

N° du département	04	05	06	13	20	83	84
Surface totale des serres florales (ha)	8	0,1	470	20	3,4	215	6,8

Répartition des serres selon leur superficie (Alpes-Maritimes, 1974)
Greenhouses repartition according to their areas (Maritim Alps, 1974)

	< 1 000 m²	1 000 à 2 000	2 000 à 5 000	> 5 000 m²	Total
Œillets	10,8	20,2	76,3	17,1	124,4
Roses	2,4 ha	16,5 ha	56,2 ha	54,5 ha	129,6 ha

C'est donc pour voir si on retrouve sur le terrain l'excès qu'indiquent les bilans théoriques, et pour déceler d'éventuels entraînements en profondeur, que nous avons étudié la répartition des principaux éléments fertilisants dans les sols et sous-sols de serres d'œillets et rosiers à fleurs coupées dans les Alpes-Maritimes et le Var.

Méthodes et techniques

Trente-deux serres ont été étudiées : dix-neuf d'œillets et treize de rosiers.

Pour creuser la fosse d'observation et les profils avoisinants sans dégâts dans des productions aussi coûteuses, on est intervenu à la fin du cycle cultural. Les serres d'œillets ont donc été examinées au printemps, du 1er avril au 15 juin, et celles de roses plutôt en février et mars, sauf dans trois cas (début juin).

Nous avons représenté par des figures les types classiques de plantation. Pour l'œillet, des planches de retenue maintiennent surélevée une « banquette » de terre et délimitent des allées en contre-bas (fig. 1). La figure 2 montre comment les rosiers sont souvent disposés : en quinconce sur deux axes séparés de 12 cm. Les lignes de cultures ainsi formées sont séparées par une zone libre ou un passage. Les échantillons de terre ont été prélevés à la tarière selon trois axes verticaux qui correspondent aux emplacements indiqués sur les figures 1 et 2 : passage, bordure et centre de banquette ou de ligne.

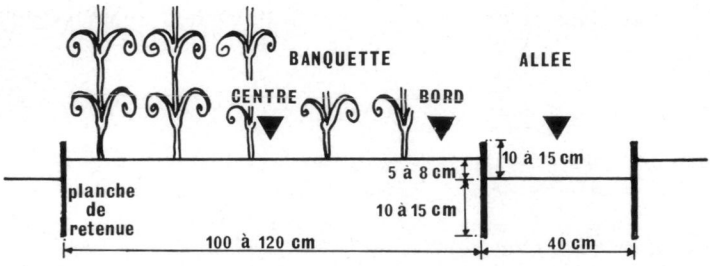


FIG. 1. — *Coupe schématique d'une plantation d'œillets (coupe verticale et perpendiculaire aux lignes de plantation)* ▼ : axe vertical de prélèvement.

Schematic section of a carnation plantation (vertical and perpendicular to plantation lines) ▼ : vertical axis of sampling.

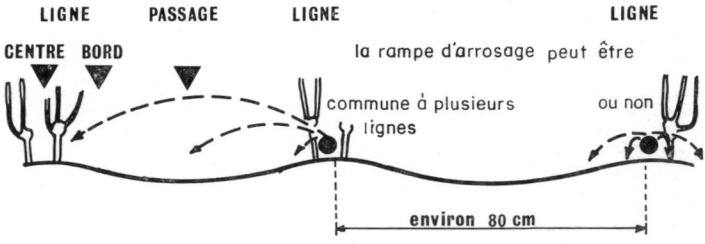


FIG. 2. — *Coupe schématique d'une plantation de rosiers. (verticale et perpendiculaire aux lignes de plantation)* ▼ : axe vertical de prélèvement.

Schematic section of a rose plantation (vertical and perpendicular to plantation lines) ▼ : vertical axis of sampling.

Les profondeurs des profils sont imposées par la nature du sous-sol. Elles se répartissent assez régulièrement entre 50 et 230 cm. Les échantillons correspondent à des tranches successives de terre qui ont des épaisseurs variant de 5 cm en surface à 20 cm en profondeur.

Sur tous ces prélèvements, les quatre caractéristiques suivantes ont été déterminées :

- azote total Kjeldahl,
- azote nitrique, par distillation,
- phosphore assimilable Truog, exprimé en P_2O_5,
- potassium échangeable, exprimé en K_2O.

Sur les mêmes fosses d'observation, on a mesuré la masse volumique du sol à différentes positions. On pouvait donc calculer les quantités d'azote nitrique contenues dans une tranche de sol, sur une surface unité de 1 m^2, en appliquant la formule :

$$Q = T. E. M.$$

où Q est la quantité cherchée, en g/m^2 :

T = la teneur en azote nitrique, en p.p.m. de terre sèche,
E = l'épaisseur de sol considérée, en m,
M = la masse volumique du sol, en t/m^3.

Pour faciliter ces calculs répétitifs, et comme les mesures individuelles semblaient nous autoriser à le faire, nous avons attribué aux sols, des masses volumiques de 1 t/m^3 dans la zone travaillée (généralement 0 à 30 cm), 1,3 sous cette zone (30 à 60 cm) et 1,5 au-delà. Pour les passages, nous avons retenu ces deux dernières valeurs : 1,3 de 0 à 60 cm, puis 1,5. Pour certains sols très légers, nous avons utilisé la séquence suivante : 0,6-1 et 1,5.

Résultats

1. — *Répartition de l'azote total, du phosphore et du potassium dans les sols de serres*

La figure 3 rassemble les valeurs observées sous les zones de culture à trois profondeurs. La plage grisée indique la gamme des teneurs considérées comme satisfaisantes en agriculture de plein champ.

1.1. — *Horizon superficiel travaillé.*

Dans la couche superficielle de 0 à 20 cm, les sols sont plutôt riches en azote total, riches à extrêmement riches en phosphore (des valeurs supérieures à 0,5 p. 1 000 sont exceptionnelles en plein champ) et également riches à très riches en potassium.

L'enrichissement des sols de serres est donc réel et très intense. Mais il n'en est pas toujours de même en profondeur.

1.2. — *Azote total et phosphore assimilable en sous-sol.*

La variabilité des profondeurs de travail du sol rend difficile le choix d'un horizon sous le labour commun à tout notre échantillon. Nous avons retenu la zone de 50 à 60 cm parce qu'elle est sous le labour dans la majorité des serres (vingt-six sur trente-

deux). Un enrichissement ne peut donc pas y être provoqué par le mélange de terre réalisé par un travail mécanique. Par contre, cette zone est assez près du fond du labour pour détecter un éventuel entraînement par le drainage.

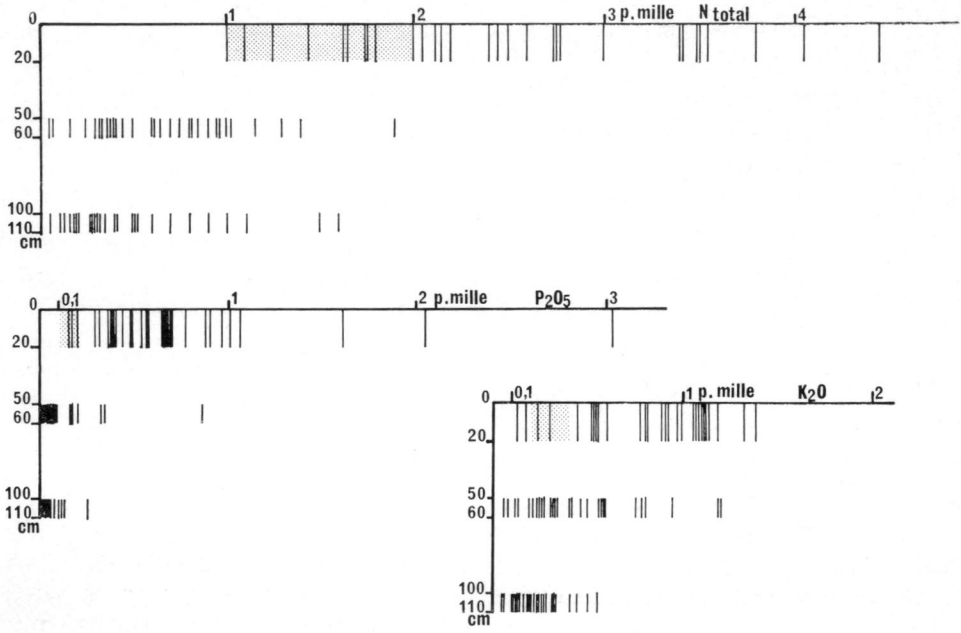


FIG. 3. — *Teneurs moyennes en azote total, phosphore assimilable et potassium échangeable, à 3 niveaux des serres examinées. La zone grisée correspond à une teneur satisfaisante en culture de plein champ.*

Soil content (average) in total nitrogen, available phosphorus and exchangeable potassium at three levels in the observed greenhouses. The grey zone corresponds to a good content for field crops.

La figure 3 montre alors qu'entre la surface travaillée et 55 cm de profondeur, les teneurs en azote total et phosphore diminuent fortement. La comparaison, cas par cas, des profondeurs de labour et des profils complets des teneurs révèle que cette discontinuité se produit en général assez brusquement sous la zone de travail mécanique du sol.

L'examen des situations où l'on enregistre les valeurs les plus élevées en profondeur confirme cette conclusion. Le tableau 3 montre que ces teneurs exceptionnelles correspondent très souvent à un remaniement mécanique : nivellement de terrasses, apport de terre, enfouissement profond (60 et 80 cm) d'amendements organiques.

Les un ou deux cas pour lesquels on ne peut trouver une telle explication traduiraient alors un entraînement en profondeur par l'eau.

Entre 55 et 105 cm, ces teneurs diminuent encore, mais plus faiblement, puisque les valeurs atteintes à 55 cm sont déjà basses.

1.3. — *Potassium échangeable en sous-sol.*

La répartition verticale du potassium échangeable est différente. A 55 cm de profondeur, la moitié des profils sont encore considérés comme riches et peu d'entre eux sont pauvres (quatre sur trente-deux). A 105 cm, la moitié des profils ont des teneurs en potassium qui correspondent à celle d'une couche labourée bien pourvue. Il arrive

TABLEAU 3

Explication par un remaniement du sol des teneurs exceptionnellement élevées en profondeur
Explanation of exceptionally high soil content of nutrients in depth by mechanical mixing of soil

	Teneur supérieure à	Nombre de serres	Nombre de cas	
			expliqués	non expliqués
N total	1 p. 1 000 à 55 cm	4	3	1
	1 p. 1 000 à 105 cm	3	3	0
P_2O_5	0,1 p. 1 000 à 55 cm	6	4	2
	0,1 p. 1 000 à 105 cm	2	1	1

donc que l'enrichissement de la couche travaillée se prolonge en profondeur, parfois à plus d'un mètre. On peut voir là l'indice d'un entraînement du cation K^+ à travers le sous-sol.

1.4. — *Répartition horizontale.*

Si l'on examine la répartition horizontale de ces trois éléments, on constate que le cas idéal d'un enrichissement réservé aux zones de culture n'est presque jamais rencontré. Une serre d'œillets implantée il y a 15 ans en fournit un exemple rarement observé (fig. 4*d*). Généralement, toute la couche superficielle est enrichie, même sous les allées (fig. 4*b*). Bien plus, souvent pour le potassium et parfois pour l'azote total et le phosphore, ce sont les allées ou passages qui présentent les teneurs les plus élevées de la couche superficielle. Les figures 4*a* et *c* montrent que cela se rencontre dans les deux types de plantation, en banquette et en ligne.

Dans le cas du potassium, la différence entre l'allée et la banquette quel qu'en soit le sens, peut se prolonger jusqu'à plus d'un mètre (fig. 4*c* et *d*). On peut d'ailleurs voir là un argument en faveur de l'hypothèse émise plus haut d'une migration en profondeur des apports faits dans la couche superficielle.

Un enrichissement plus important dans les allées n'implique pas nécessairement que les apports soient plus abondants dans cette zone. Ce pourrait être le cas, pour des raisons de commodité, dans les cultures de longue durée de roses, où le travail du sol près des plants est impossible et où les mulches de paille ou les apports d'amendements organiques sont localisés surtout dans les interlignes. Mais comme on observe souvent que la densité racinaire est beaucoup plus faible sous les passages, il se peut également qu'après un apport uniforme sur toute la surface de la serre, les prélèvements par les racines provoquent une telle différenciation. D'après la figure 4*c*, cet enrichissement des allées serait inutile puisque le potassium est progressivement entraîné hors de la portée des racines.

1.5. — *Echantillonnage du sol.*

L'importance des hétérogénéités de répartition verticale et horizontale pose, une fois de plus, le problème de l'échantillonnage. Même si on s'en tient à la zone de culture et à la couche superficielle, les résultats d'analyse et, par suite, les conseils de fer-

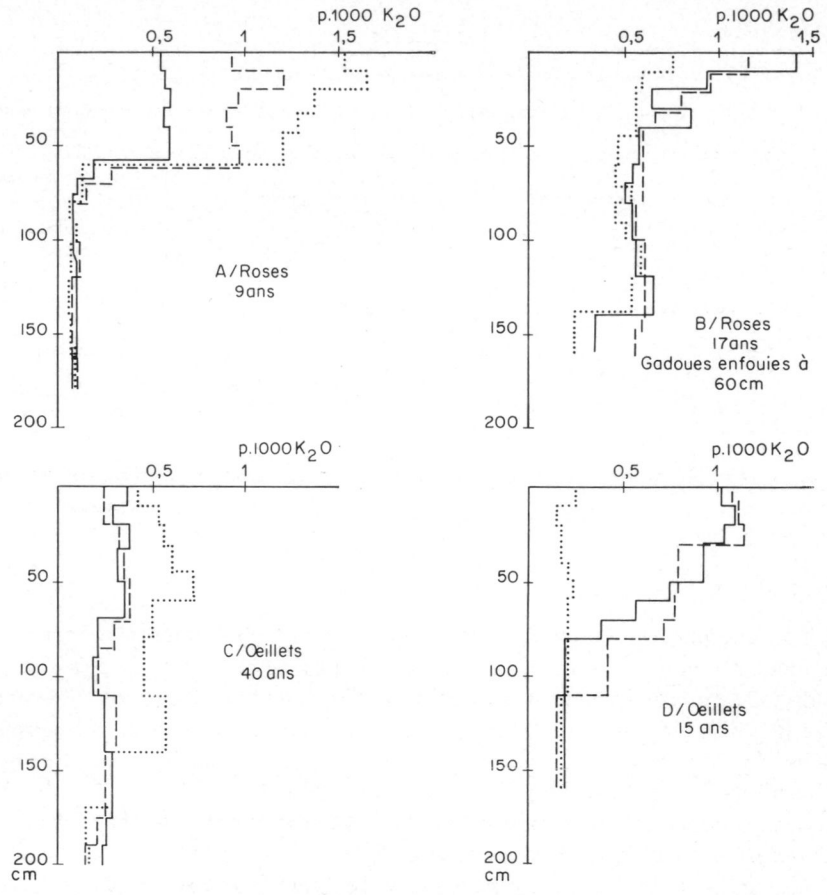


FIG. 4. — *Exemples de profils verticaux des teneurs en potassium échangeable dans les sols.*
Examples of the vertical distribution of exchangeable potassium in the soils.

..... Allée (Pathway)
– – – – – Banquette, bord
——— Banquette, centre

tilisation seront très différents selon la profondeur et la répartition spatiale des prélèvements. Le tableau 4 l'illustre bien pour le phosphore et le potassium.

Pour un conseil de fertilisation, il faut avoir un échantillon représentatif de l'ensemble de la zone superficielle exploitée par les racines. Les prélèvements doivent donc être répartis également dans toute la largeur de la zone de culture et avoir la profondeur de la zone travaillée et ameublie. Il ne faut surtout pas les regrouper dans une certaine position parce qu'elle est plus commode d'accès, en bordure de banquette par exemple.

Pour comparer des traitements dans une expérimentation, il peut être préférable d'analyser séparément diverses situations microtopographiques. On obtiendra ainsi une image de l'hétérogénéité de répartition de la fertilisation selon les techniques employées.

TABLEAU 4

Hétérogénéité de répartition dans la couche labourée

Pour 2 profils on a calculé les résultats de l'analyse chimique d'échantillons prélevés en différentes positions. On indique la fumure de fond (en g/m²) et la fumure d'entretien (située par rapport à une formule de référence) qui seraient conseillées au vu des résultats de l'analyse.

Heterogeneity of distribution in the ploughed zone

The results of chemical analysis of soil samples taken in different places has been calculated for two profiles.

	Profondeur du prélèvement	Localisation	Teneur (p. 1 000)	Fumure de fond	Fumure d'entretien
Œillet	0-20 cm 0-30 cm	bordure de banquette	0,95 0,69	nulle 50 g superphosphate	moitié normale
P_2O_5	0-20 cm	centre	0,32	100 g superphosphate	normale
Rosier	0-15 cm	sur la ligne	1,76	nulle	nulle
K_2O	0-15 cm 5-25 cm	près de la ligne de plantation	0,86 0,73	nulle 25 g SO_4K_2	moitié normale

2. — *Répartition des nitrates dans les sols de serres*

2.1. — *Sol.*

La figure 5 présente les quantités d'azote nitrique retrouvées à différents niveaux dans les profils examinés. Les quantités sont exprimées en g d'azote nitrique par m² (soit en dizaines de kg/ha).

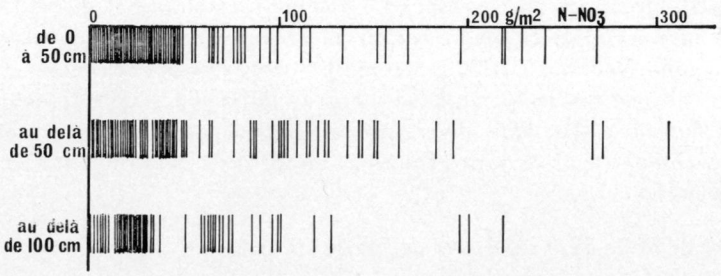


FIG. 5. — *Quantités d'azote nitrique trouvées à 3 niveaux dans tous les profils examinés, sur une section horizontale unitaire* (en $N.NO_3$, $g/m^2 = 10$ kg/ha).

Amounts of nitrate nitrogen found at three levels in all the observed profiles on an unatary ond horizontal section (in $N.NO_3$, $g/m^2 = 10$ kg/ha).

Pour situer l'importance des valeurs observées nous proposons les références suivantes : pour assurer une nutrition azotée convenable en période de végétation active, il semble qu'une teneur en azote nitrique de 50 p.p.m. dans la zone exploitée par les racines suffise largement (d'après Moulinier, 1975). Les valeurs de 100 à 150 p.p.m. que Little et Yuen (1973) recommandent pour l'œillet paraissent excessives

Elles correspondent d'ailleurs à des conditions culturales très différentes de celles que nous avons examinées.

Sur une profondeur de 50 cm, apparaissant après cette étude comme un maximum pour la zone de forte densité racinaire, ces 50 p.p.m. correspondent à environ 30 g d'azote par m^2. Les exportations annuelles sont de 100 à 120 g d'azote par m^2.

Or, 45 p. 100 des profils contiennent 30 g/m^2 ou moins entre 0 et 50 cm. Un tiers contient de 50 à 270 gm/^{2}, quantités excessives.

2.2. — *Sous-sol.*

Au-delà de 50 cm, on trouve des quantités d'azote comparables. Plus des deux tiers des profils renferment de 20 à 300 g/m^2 entre 50 cm et la profondeur maximale examinée. Les quantités retrouvées au-delà d'un mètre sont également très élevées. Deux tiers des profils contiennent de 20 à 200 g/m^2 dans l'épaisseur de sous-sol examinée au-delà d'un mètre.

A l'inverse, nous n'avons que très rarement mesuré une teneur en azote nitrique nulle ou négligeable au bas du profil examiné. Pour seulement huit profils, répartis dans cinq serres, on atteint effectivement la profondeur à laquelle on ne trouve pratiquement plus d'azote minéral. Partout ailleurs, il y a entraînement des nitrates au-delà de la profondeur examinée.

Le lessivage des nitrates à travers le sous-sol est donc très fréquent et en même temps très intense.

2.3. — *Teneur en $N\text{-}NO_3$ de l'eau du sous-sol.*

Nous avons tenté d'évaluer la concentration en azote nitrique de l'eau du sous-sol en estimant la teneur volumique en eau à 35 p. 100. Sur notre échantillon, pour les profils supérieurs à 120 cm, la médiane des quantités d'azote nitrique réparties entre 100 et 160 cm correspond à 30 g/m^2. Cette quantité diluée dans l'eau retenue par 0,6 m^3 de sol, soit 210 litres environ, correspond à une concentration de 140 mg/l ou 10 meq d'azote par litre. D'après ce même calcul, plusieurs serres présenteraient dans leur sous-sol des concentrations de 300 à 500 mg/l d'azote nitrique. Comme la norme de potabilité en France est de 10 mg/l, on mesure l'importance de la teneur en azote nitrique de ces eaux. Toutefois divers processus pourraient diminuer cette charge avant une éventuelle reprise de ces eaux par un forage : dénitrification, dilution par la nappe souterraine...

2.4. — *Etude détaillée de la répartition de l'azote nitrique.*

On peut examiner plus en détail les profils de répartition. Le tableau 5 présente les moyennes des quantités d'azote nitrique trouvées dans les trois couches déjà considérées ci-dessus pour différentes cultures et localisations.

Pour la couche de 0 à 50 cm, les plus forts enrichissements se trouvent sous les allées des serres d'œillets, et plus précisément dans les dix premiers centimètres. De 0 à 10 cm sous ces allées, on a mesuré 7 fois sur 19 des teneurs supérieures à 500 p.p.m. Puis viennent les passages des serres de rosiers, et en dernier seulement, les zones cultivées sous œillets comme sous rosiers.

En profondeur par contre, les plus fortes quantités sont retrouvées sous les rosiers. Sous la zone cultivée, au-delà de 50 cm, on a deux fois plus d'azote nitrique qu'à la

TABLEAU 5

Répartition des quantités moyennes d'azote nitrique trouvées dans les sols de serres (en g/m² de section horizontale)

Distribution of nitrate nitrogen in greenhouses soils (in g/m² of horizontal section)

	Œillet		Rose	
Profondeur	banquette	allée	ligne de culture	passage
0 à 50 cm	39	106	34	61
50 à 100 cm	24	20	26	20
au-delà de 100 cm	26	29	66	45

même profondeur sous les banquettes d'œillets, et trois fois plus qu'en surface sous les mêmes lignes de rosiers. Ce dernier chiffre rend manifeste l'entraînement en profondeur des nitrates qui n'ont été ni consommés par la plante, ni fixés par la microflore de la zone travaillée. Le phénomène est observé sous œillets également puisqu'on trouve, en moyenne, autant de nitrates entre 0 et 50 cm qu'au-delà de cette dernière profondeur.

La figure 6 présente des exemples de trois situations typiques : *jeune serre, sans entraînement* (fig. 6A) : les nitrates sont localisés dans la zone exploitable par les racines. On n'observe pas d'entraînement en profondeur, mais une accumulation sous la surface de l'allée.

Entraînement en profondeur : Les figures 6C et D rapportent deux exemples de cette répartition, observée principalement sous des cultures de roses en ligne dans lesquelles le passage entre 2 lignes est, lui aussi, arrosé par l'irrigation fertilisante (comme l'indique la fig. 2). Cet arrosage suffirait à empêcher l'accumulation de nitrates sous le passage. Il semble en effet que l'engrais soit assez régulièrement entraîné en profondeur.

Une absorption moindre par les racines sous le passage pourrait expliquer que les teneurs en nitrates restent souvent supérieures à celles que l'on rencontre sous les lignes.

Entraînements verticaux et latéraux simultanés : La figure 6B correspond à une serre de 2 ans. On observe sous la banquette cultivée un pic de nitrates entre 50 et 80 cm de profondeur. Parallèlement à cet entraînement en profondeur, on note une accumulation en surface au bord de cette même banquette et surtout dans l'allée. Cette situation est très fréquente pour les cultures en banquettes surélevées et séparées par des allées.

L'apport d'eau et d'engrais dissous est fait au-dessus de la banquette. Une partie de l'engrais est absorbée par les racines. Mais il subsiste un excédent dont la répartition traduit une double circulation de l'eau : drainage en profondeur, hors de portée des racines et entraînement latéral vers les allées où l'évaporation de l'eau conduit à une accumulation énorme de nitrates, souvent amplifiée par une faible exploitation racinaire.

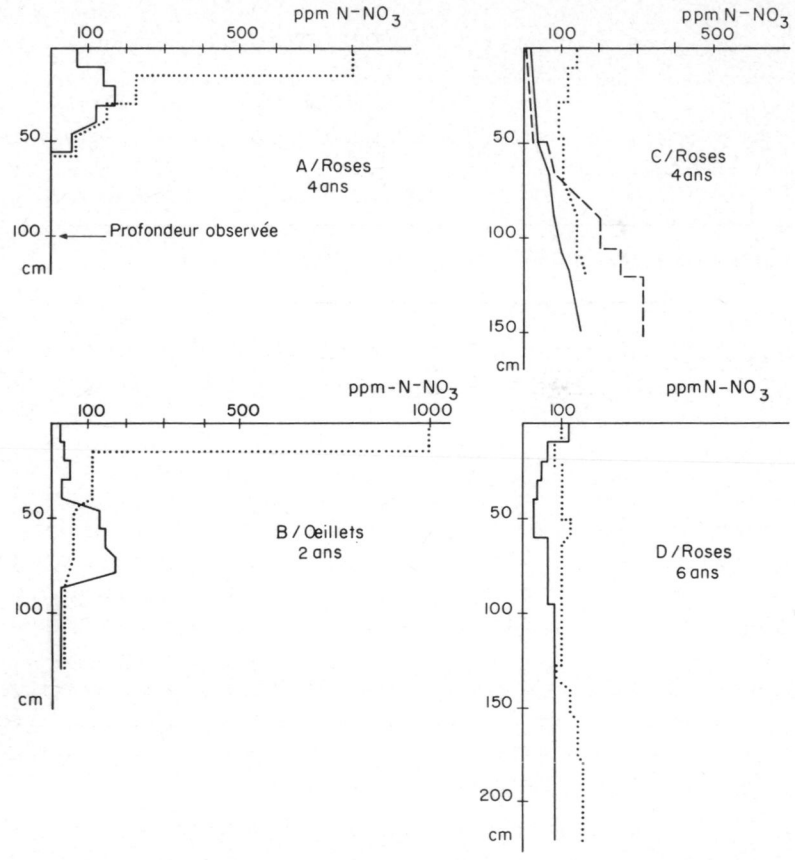


FIG. 6. — *Exemples de profils verticaux des teneurs en azote nitrique dans les sols.*
Examples of the vertical distribution of $N\text{-}NO_3$ *contents in the soils.*

..... Allée (Pathway)
– – – – – Banquette, bord
——— Banquette, centre

2.5. — *Echantillonnage du sol.*

Enfin, l'extrême hétérogénéité spatiale des teneurs en nitrates pose avec encore plus d'acuité que dans le cas du phosphore et du potassium le problème de l'échantillonnage. A ce stade de variabilité, on peut d'ailleurs s'interroger sur la validité de l'interprétation quelle que soit la technique de prélèvement.

Si l'objectif est la mesure du risque d'entraînements des nitrates, il faut faire des prélèvements sous la zone labourée. Une couche superficielle pauvre peut surmonter un sous-sol extrêmement enrichi par le lessivage des apports précédents (fig. 6B et C).

Lorsque les allées ne sont pas soumises à l'irrigation, un indice d'une alimentation antérieure excessive pourrait être obtenu commodément par l'analyse d'un échantillon pris dans les premiers centimètres de ces zones d'évaporation.

Conclusions

Nos observations de sols sous serres d'œillets et rosiers des Alpes-Maritimes et du Var font ressortir les points suivants :

1. La couche superficielle travaillée est généralement très riche en azote total, phosphore assimilable et potasse échangeable. Mais cet enrichissement est inutile dans des zones peu ou pas exploitées par les végétaux, comme les passages et allées.

2. Le sous-sol présente des teneurs en azote total et phosphore assimilable normales en agriculture ; par contre, les teneurs en potassium échangeable peuvent être encore élevées. Il semble que cet élément puisse être entraîné soit en profondeur, soit latéralement vers les zones d'évaporation (allée). Toutefois, on ne voit pas là un risque de dégradation de l'environnement.

3. L'azote nitrique, très mobile, peut être entraîné en grande quantité sur toute la profondeur examinée (2 m). L'absence de nitrates en profondeur sous les serres de rosiers et œillets est extrêmement rare. Par contre, deux types d'enrichissement sont fréquents :

3.1. — *En profondeur*, il résulte alors d'un entraînement de nitrates par l'eau de drainage. En effet, le faible taux de matières organiques dans les sous-sols interdit une minéralisation aussi importante.

On observe cet entraînement même quand il n'y a jamais eu de lessivage volontaire du sol. D'une façon générale, l'apport d'eau dans les serres excède donc l'évapotranspiration réelle. Comme les irrigations fertilisantes conseillées sont toujours inférieures aux besoins en eau des cultures (tabl. 6), cet excédent vient des arrosages complémentaires à l'eau pure.

TABLEAU 6

Comparaison entre les apports d'eau par irrigation fertilisante conseillés et les besoins en eau des cultures sous serres de verre évalués par Villèle (1972) (*en* mm/mois)

Comparison between the advised amounts of water for fertilizing irrigation and the water needs for crops under glass-houses from Villèle (1972) (*in* mm/month)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Besoins en eau à Nice ..	32	47	71	97	119	138	155	132	97	62	38	27
Conseils-œillets	15	15	15	80	80	80	80	80	15	15	15	15
Conseils-roses	15	15	30	30	30	30	30	30	30	15	15	15

3.2. — *En surface dans les allées*. Ces allées sont souvent riches en matières organiques et doivent effectivement être le siège d'une minéralisation importante, mais qui ne peut rendre compte des teneurs atteintes localement (1 000 p.p.m.). Dans ce cas, l'accumulation de nitrates en surface révèlerait l'importance du transfert de la solution du sol des zones cultivées irriguées vers les allées ou passages, peu arrosés. Ce phénomène a déjà été signalé dans les cultures en billons irrigués (Drouineau,

Lefèvre et Blanc, 1953) ; mais les accumulations n'y dépassaient pas 300 p.p.m. sur 2 cm d'épaisseur. Elles atteignent ici couramment 1 000 p.p.m. sur 10 cm.

4. Ces observations confirment que les apports d'éléments fertilisants dépassent très largement les exportations. Elles mettent en évidence un enrichissement inutile du sol et des entraînements en profondeur. Ces pertes par lessivage sont limitées pour le potassium, mais généralisées et intenses pour les nitrates.

Pour mieux apprécier les risques de contamination des nappes il faudrait pouvoir évaluer par des observations semblables mais répétées, le flux de nitrates ainsi entraînés. Il faudrait également apprécier l'effet des processus qui tendent à diminuer cette contamination : dénitrification, dilution...

Pour améliorer cette situation, il faut établir des bilans qui tiennent compte des fournitures réalisées par la minéralisation des matières organiques introduites ou présentes dans le sol. Moulinier (1974) par exemple, a publié des cinétiques de minéralisation de l'azote du fumier et des écorces. On sera alors amené à diminuer les amendements organiques ou la fertilisation d'entretien. Il faut également sensibiliser les horticulteurs afin qu'ils perdent l'habitude encore trop généralisée d'augmenter les doses préconisées.

5. Enfin, la connaissance de la répartition des éléments fertilisants dans les sols et sous-sols de serres permet de proposer diverses techniques d'échantillonnages, qui diffèrent selon les objectifs poursuivis.

Reçu pour publication en mai 1978.

Remerciements

C'est pour nous un plaisir de remercier ceux qui ont permis à cette étude de voir le jour : Le Ministère de la Culture et de l'Environnement qui a participé au financement, R. Gras (Station d'Agronomie I. N. R. A., Antibes) qui a dirigé l'enquête et la campagne de prélèvements, enfin les techniciens du C. E. T. A. Floral Varois et du Service Floral d'Antibes qui nous ont introduits dans de nombreuses exploitations.

Summary

Nutrients distribution in greenhouses soils of the South of France (Carnations and Roses)

The distribution of nutrients in the first two meters of soil has been studied under nineteen greenhouses cultivated with carnations and thirteen with roses. The enrichment of the ploughed zone is very important (mean contents between 0 and 20 cm deep are : total N : 2.5 p. 1 000 ; Truog P_2O_5 = 0.7 p. 1 000 ; exchangeable K_2O : 0.9 p. 1 000). Total N and Truog P contents become low just below the ploughed zone ; they are not leached. Under 50 cm deep, high N_T or P contents are found only if some mechanical mixing of soil has been done : (e. g. : levelling, bringing in of soil ; deep disposal of sludges...).

Nitrate nitrogen is often in excess in the ploughed zone : 1/3 of the profiles observed retain between 500 and 2 700 kg NO_3-N/ha in the first 50 cm of oil. The pathways are often the most enriched zones : in the first 50 cm one could measure on an average : 1 000 kg NO_3-N/ha under carnations and 600 under roses, while in the cultivated areas the corresponding figures are : 400 kg NO_3-N/ha under carnations and 350 under roses. NO_3-N is transfered to the pathways when they are not watered, and accumulates in the first 10 cm where water evaporates. 1 000 kg NO_3-N/ha were often measured there between 0 and 10 cm.

NO_3-N is also leached. Deeper than 100 cm one could find on an average : 270 kg NO_3-N/ha under carnations and 500 kg/ha under roses. 2 200 kg/ha is an observed maximum. The NO_3-N content of soil water between 100 and 160 cm is by mean 140 mg/l, with 500 mg/l as a maximum. The absence of NO_3-N at the bottom of a profile is uncommon.

The potassium is also leached but in lesser quantity.

These findings point out the need of a better balance between the incoming of nutrients either in an organic or a mineral form, and the need of the crops. They also allow better sampling of the soil.

Zusammenfassung

Verteïlung der Düngstoffe innerhalb der Böden der Blumengewächshaüser Südfrankreichs (Nelken und Rosenstraücher)

Die Verteilung der Düngstoffe wurde auf ungefähr 2 m Tiefe in den Böden von 19 Nelkengewächshaüser und 13 Rosenstraüchergewächshaüser mit Schnittblumen studiert. Die Anreicherung der bebauten oberflächlichen Schicht ist sehr wichtig (Durchschnitt der Gehalte in den 20 ersten Zentimetern : Gesamt N = 2,5 p. 1000, aufnahmefähiger P_2O_5 Truog = 0,7 p. 1000 ; austauschbarer K_2O = 0,9 p. 1000). Die Gehalte an N und P_2O_5 nehmen unter der bestellten Zone plötzlich ab und werden niedrig im Untergrund. Det salpetersauere Stickstoff ist sehr beweglich. Es werden zwei Arten von Auslaugen beobachtet :

1) In der Tiefe wegen des Entwässerungswassers auch ohne absichtliches Bodenauslaugen : 2/3 der Profile enthalten den Wert von 200 zu 2 200 kg $N\text{-}NO_3$ pro ha über 1 m Tiefe.

Die Abwesenheit von Nitraten in der Tiefe bildelt eine Ausnahme.

2) Oberflächlich gegen die nicht bewässerten Alleen (die durch Verdunstung bedingte Speicherung erreicht oft den Wert von 1 000 kg $N\text{-}NO_3$/ha in den 10 ersten Zentimetern).

Kalium ist ebenfalls demselben Auslaugen unterworfen, jedoch in geringerem Masse.

Diese Beobachtungen führen zu einer besseren Anpassung der organischen Düngemittel und Fruchtbarmachung an die Pflanzenbedürfnisse. Sie ermöglichen auch eine Verbesserung der Methoden für de Bodenprobenentnahme zur Analyse.

РЕЗЮМЕ

Распределение питательных элементов в почвах цветочных теплиц юга франции.

А. МОРИЗО.

В 19-ти теплицах гвоздики и 13-ти теплицах роз изучалось, после сбора цветов, распределение питательных элементов в слое почвы, приблизительно до 2-х метров глубины. Обогащение поверхностного, обработанного слоя - очень велико (среднее содержание в 20-ти первых сантиметрах : общий азот — 2,5 p. 100 ; усвояемый P_2O_5 по Труогу — 0,7 p. 100 ; обменный K_2O — 0,9 p. 100). Под распаханной зоной содержания общего азота и P_2O_5 резко уменьшались и становились совсем небольшими - в подпочве. Нитратный азот - был очень подвижен.

Отмечалось два типа увлечения элементов :

1) Водой дренажа в глубину, даже в случаях добровольного вымывания почвы ; 2/3 профилей содержали от 200 до 2 200 кг N — NO_3/га на глубинах превышавших 1 метр.

Отсутствие нитратов на глубинах являлось исключением.

2) По поверхности к неполивавшимся аллеям (аккумуляция вызванная испарением достигала обычно приблизительно 1 000 кг N — NO_3/га в первых 10-ти сантиметрах.

Калий увлекался также, но с гораздо меньшей интенсивностью.

Эти наблюдения указывают на необходимость лучшего согласования органических удобрений, как и удобрений вообще, с нуждами растений. Они должны позволить также улучшения методов отбора проб почв для анализов.

Références bibliographiques

BLANC D., 1967. La production de l'œillet américain. *Bull. Techn. Inf.*, **217.**

BLANC D., 1975. Evolution des caractéristiques chimiques des sols en cultures protégées. *Ann. Gembloux*, **81,** 47-58.

DALBRO K., DORPH-PETERSEN K., 1976. Soil sampling in drip irrigated glasshouse. *Tidsskr. Planteavl*, **80,** (5), 651-655.

DARTIGUES A., MORLAT R., 1976. Considérations sur les sols de pépinières à rosiers de Doué la Fontaine. *Pépiniéristes, Hortic. Maraîchers*, **166**, 45-56.

DROUINEAU G., LEFÈVRE G., BLANC-AICARD D., 1953. Observations sur la localisation de l'azote minéral en été sous le climat méditerranéen. Ann. INRA, **2,** 245-256.

GACHON L., 1974. Réflexions sur l'utilisation des engrais. *Bull. Techn. Inf.* **295,** 839-849.

GOUJON C., 1977. La culture des rosiers de serre. *Pépiniéristes, Hortic. Maraîchers,* **176,** 53-56.

GOUNY G., CORNILLON P., 1969. Les sols et la fertilisation des cultures maraîchères de primeurs en Provence occidentale. *Pépiniéristes, Hortic. Maraîchers,* **97,** 5724-5732.

GOUNY P., 1975. Les possibilités de l'irrigation fertilisante. *Pépiniéristes Hortic. Maraîchers,* **161,** 29-32.

HAURET M., 1973. Rapport introductif sur la pollution des eaux par les engrais chimiques utilisés dans l'agriculture. *Conseil de l'Europe* 10 janvier 1973.

HÉBERT J., 1974. Recommandations aux agriculteurs pour limiter l'enrichissement des nappes d'eau en éléments fertilisants. *Bull. Techn. Inf.* **295,** 851-854.

LITTLE R. C., LOWSING TONG KWONG YUEN, 1973. Variation in nutrient content of glasshouse soils. *Exp. Hortic.,* **25,** 102-111.

MOULINIER H., 1974. Evolution des teneurs en nitrates dans les sols amendés par de la tourbe, des écorces de résineux ou des écorces de feuillus. *C. R. Acad. Agric.,* 268-274.

MOULINIER H., 1975. La fertilisation des cultures sous serres. *Sci. sol,* **2,** 155-160.

MOULINIER H., MONTARONE M., 1976. La nutrition du rosier cultivé sous serre. *Le Rosier,* juillet 1976, 21-38.

NISEN A., 1972. La pollution des sols en culture protégée. *Pépiniéristes, Hortic. Maraîchers,* **127,** 35-40.

OCDE, 1973. *Impact des engrais agricoles et déchets d'élevage sur la qualité des eaux.* OCDE. Direction de l'Environnement. Paris.

DE VILLÈLE O., 1972. Besoins en eau des cultures sous abris. *Pépiniéristes, Hortic., Maraîchers,* **127,** 21-27.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 193-207.

Technique d'étude de l'orientation des particules argileuses utilisable sur des échantillons secs ou humides

D. TESSIER

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Une technique de mesure de l'orientation des particules argileuses basée sur la diffraction des rayons X a été mise au point.

Sur un échantillon d'argile non perturbé, on prélève une tranche à partir de laquelle on obtient un diagramme de rayons X par transmission. Quand les particules sont orientées dans une direction préférentielle, l'intensité le long des anneaux Debye-Scherrer présente des valeurs maximales ; la densitométrie d'un demi-anneau correspondant à la raie 001, permet de tracer une courbe de densité optique à partir de laquelle on déduit un indice d'orientation et un domaine d'orientation préférentiels.

Cette méthode est utilisable sur des argiles depuis des teneurs en eau correspondant à pF1 ; elle a été testée sur des matériaux illitiques, kaolinitiques et montmorillonitiques et a contribué à suivre l'évolution de l'organisation des argiles au cours du phénomène de retrait.

Introduction

Lorsqu'on aborde les problèmes relatifs à l'organisation des matériaux argileux, on se heurte immédiatement à une difficulté majeure : celle qui consiste à décrire le système poreux. Cette difficulté se comprend d'autant plus aisément que les argiles sont constituées de particules fines (taille voisine du micron) et que l'organisation de ces particules dépend, entre autres, des conditions hydriques du milieu.

C'est ainsi que les méthodes de visualisation, ou bien ne permettent pas un grossissement suffisant (microscope optique), ou encore nécessitent une congélation ou une déshydratation poussée de l'échantillon (microscope à balayage) qui risque de perturber l'organisation en place. Ajoutons à cela le fait que toutes les méthodes d'observation permettent difficilement une évaluation quantitative de l'orientation et qu'elles requièrent, de la part de l'observateur, un bon entraînement. Nous voyons donc que ces méthodes restent difficilement utilisables sur des échantillons humides.

C'est pour cet ensemble de raisons que nous avons décidé de porter notre effort sur l'utilisation de la diffraction des rayons X en vue de l'étude de l'organisation des argiles aux fortes teneurs en eau.

Signalons tout d'abord que de nombreux auteurs se sont intéressés aux problèmes relatifs à l'orientation des particules argileuses du fait en particulier que les minéraux

phylliteux possèdent un faciès planaire qui favorise cette orientation. C'est ainsi que, dès 1953, Brindley a montré que les diagrammes de poudre effectués sur certains minéraux naturels pourraient être utilisés pour une étude d'orientation. Ultérieurement et à plusieurs reprises ce problème a été envisagé, mais de manière tout à fait indirecte ; en effet, lorsqu'on veut procéder à des déterminations de composition, l'orientation apparaît plutôt comme une cause d'erreur.

Aussi pour les matériaux kaoliniques, Van der Marel (1962), Brindley (1961), Taylor et Norrish (1966) ont tenté de préciser la variation de l'intensité diffractée en fonction de l'orientation des particules. Plus récemment, Martin (1966) a même proposé pour la kaolinite, une méthode d'étude *directe* de l'orientation : les études se font alors sur des échantillons naturels, secs ou humides, mais après imprégnation par une résine et consolidation. La mesure repose sur la comparaison de l'intensité de la raie 002 à celle de la raie 020 ; on détermine ainsi un rapport appelé PR (pick ratio), qui semble caractéristique de l'orientation des plaquettes au sein de l'échantillon étudié.

Enfin, il faut signaler que plusieurs chercheurs ont proposé une formulation mathématique de l'orientation appréhendée au moyen des rayons X ; citons en particulier Taylor et Norrish (1966) et Lipmann (1969).

I.1. — Principe de la méthode : diffraction des rayons X par un échantillon d'argile orienté

a) *Cas général : étude et signification d'un diagramme Debye Scherrer* (cf. fig. 1)

Soit un faisceau de rayons X AO qui tombe sur une série de plans équidistants de direction parallèle à tt', il est diffracté suivant OR. La direction du faisceau diffracté est donné par la droite qui joint le centre de la sphère de réflexion de centre O au point où l'extrémité du vecteur réciproque coupe cette sphère. Ainsi, il existe une réflexion sélective chaque fois qu'un point du réseau réciproque coïncide avec la surface de la sphère de réflexion.

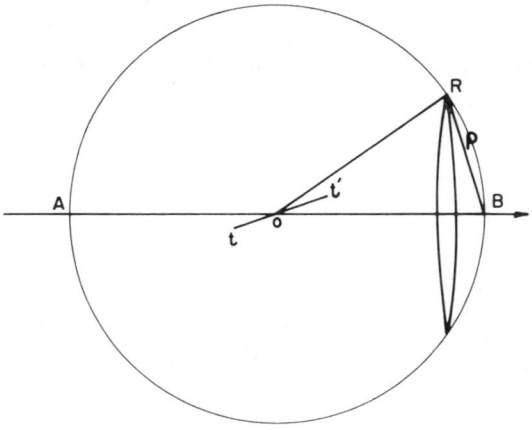


FIG. 1. — *Diffraction du rayonnement X par une série de plans cristallins.*
X-ray diffraction from a set of crystalline planes.

Dans un diagramme de poudre, les réseaux réciproques des différents microcristaux possèdent toutes les orientations possibles et ont leur origine en B. Pour chaque cristallite, le vecteur réciproque correspondant à une série de plans hkl équidistants étant égal à 1/d hkl, tous les nœuds hkl se trouvant sur la sphère de réflexion dessinent un cercle d'axe OB.

Les diagrammes de poudre totalement désorientés donnent la longueur des vecteurs du réseau réciproque, mais non leur orientation. Dans le cas des échantillons orientés, il devient en revanche possible d'envisager une représentation de l'orientation mutuelle des vecteurs, donc de définir une orientation des particules elles-mêmes.

b) *Analyse de l'orientation au sein d'une poudre microcristalline*

Considérons un échantillon immobile en forme de plaquette mince d'épaisseur homogène placé perpendiculairement à la direction de propagation d'un faisceau de rayons X cylindrique et d'intensité uniforme. Cet échantillon est constitué par une infinité de cristallites de dimensions sensiblement identiques. Si l'on admet que l'absorption est pratiquement négligeable, chacun des cristallites placé devant le faisceau de rayons X reçoit la même intensité.

Pour qu'un cristallite participe à la formation d'une raie D.S. d'indice (hkl), il faut que la normale aux plans réticulaires (hkl) fasse avec la direction des rayons incidents l'angle $\frac{\pi}{2} - \alpha$ (avec $\alpha = \theta + \Delta\theta$ qui définit le domaine de réflexion pour l'angle de Bragg θ). Si $I(\theta)$ est l'intensité réfléchie par seconde pour les plans (hkl) d'un cristallite et s'il y a, dans le volume baigné, n normales équivalentes convenablement orientées, l'intensité totale diffractée par l'échantillon pour la réflexion (hkl) est $I = nI(\theta)$. Cette énergie est reçue sur le film photographique le long de l'anneau Debye Scherrer. Deux cas peuvent alors se présenter :

1. La répartition dans l'échantillon des orientations des cristallites est parfaitement isotrope : l'énergie diffractée par les plans d'indice (hkl) est uniformément répartie sur l'anneau D.S. correspondant (cf. fig. 2).

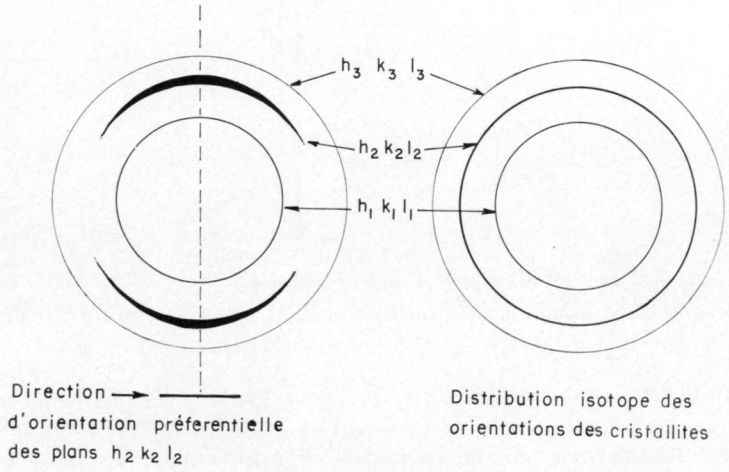


FIG. 2. — *Diagrammes Debye-Scherrer.*
Diffraction patterns obtained from a powder camera.

2. Certains plans (hkl) des cristallites sont orientés dans des directions préférentielles par rapport aux caractéristiques géométriques de l'échantillon ; dans ce cas, le nombre de normales faisant avec la direction du faisceau incident l'angle $\frac{\pi}{2} - \theta$ peut être plus élevé pour θ donné (et pour ces directions) que dans une distribution au hasard. En conséquence, la répartition de l'énergie le long de l'anneau D.S. considéré n'est plus homogène, mais présente des valeurs maximales dans les directions des orientations préférentielles correspondant aux normales aux plans (hkl). Dans ce cas, la simple observation des diagrammes D.S. permet donc de détecter aisément d'éventuelles orientations préférentielles des particules cristallines (cf. fig. 2).

c) *Problèmes résultant des phénomènes d'absorption* (cf. fig. 3)

Soit un faisceau de rayons X de section S normal à un échantillon d'argile homogène et considérons le faisceau diffracté sous l'angle 2 θ. Les rayons X parcourent le même trajet pour chaque point de la tranche dx ; dans ces conditions, l'absorption prendra la même valeur, quelle que soit l'orientation de la particule pourvu que celle-ci satisfasse à la loi de Bragg.

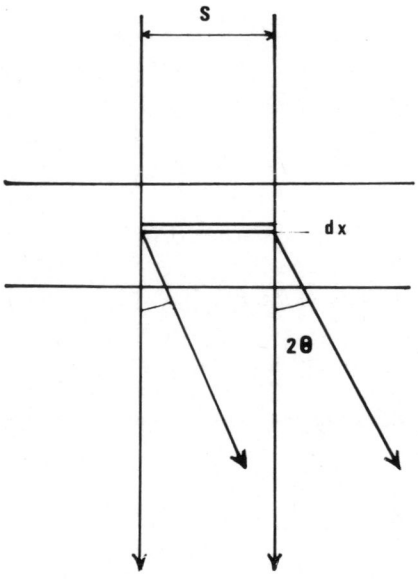


FIG. 3. — *Schéma montrant l'absorption du faisceau de rayons X par une tranche d'échantillon.*
Schematic representation of the absorption of an X-ray beam traversing a slab of material.

On sait d'autre part que l'absorption d'un échantillon ne dépend pas du mode d'assemblage des atomes, mais de l'absorption caractérisant chacun des éléments constituants. On voit donc que dans un échantillon suffisamment homogène et si l'on respecte le montage ci-dessus, l'intensité réalisée en chaque point est affectée du même coefficient d'absorption.

1.2. — Réalisation pratique et technique d'utilisation des échantillons

L'étude des matériaux argileux aux très grandes humidités exige tout d'abord, que l'on puisse faire des observations aux *petits angles de diffraction.*

D'un autre côté, il est impératif d'éviter toutes modifications d'humidité de l'échantillon, donc de son état d'organisation au cours des mesures. Dans ces conditions, il s'avère indispensable de *limiter les temps d'exposition* et d'empêcher tout contact avec l'air ambiant.

a) *Dispositif de diffraction X adopté* (fig. 4)

Nous avons retenu un dispositif avec chambre plane, qui se rapproche de celui utilisé par Barshad dans son laboratoire de l'Université de Berkeley (U.S.A.). Le porte-échantillon, ainsi que le mode de préparation de l'échantillon, ont été en revanche adaptés à ce travail.

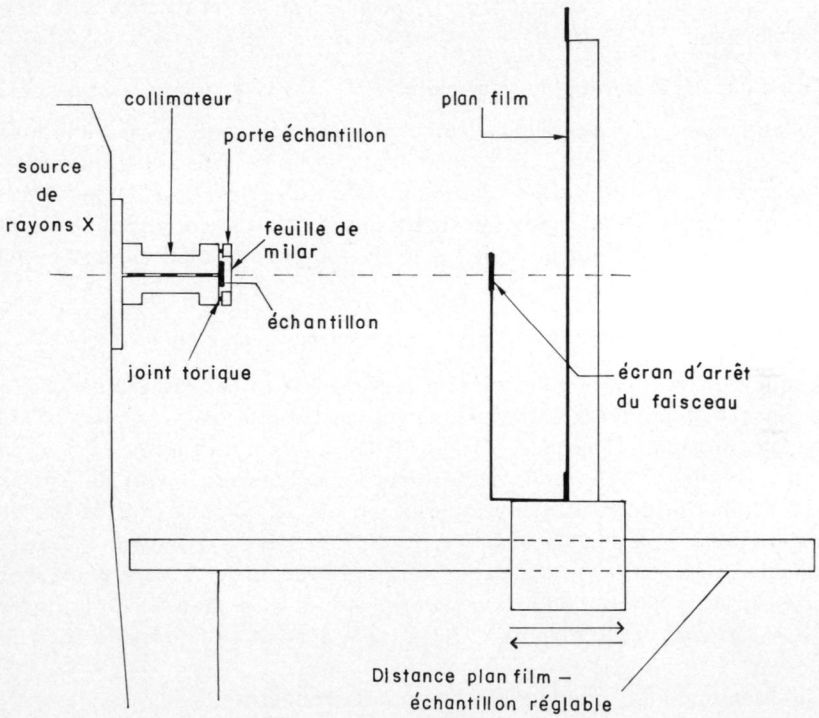


FIG. 4. — *Dispositif Chambre plane.*
Flate plate arrangement.

Chambre plane.

Elle est constituée d'un ensemble porte-échantillon collimateur fixé sur le générateur et d'une partie mobile, le porte-film, qui peut être éloigné ou rapproché suivant les besoins.

Nous avons utilisé des collimateurs de 0,5 et de 0,7 mm. Pour éviter les pertes d'énergie, le porte-échantillon et le collimateur ont été rendus solidaires.

La partie mobile sur laquelle le film est fixé permet une grande souplesse d'utilisation. Ainsi, lorsque les équidistances (001) sont élevées, l'éloignement du plan film de l'échantillon permet de confectionner des diagrammes D.S. dont l'anneau présente un diamètre suffisamment grand pour permettre la réalisation d'une densitométrie correcte. Par exemple, pour une montmorillonite-Ca (d(001) = 20 Å), avec une distance plan film-échantillon de 150 mm, l'anneau mesure 25 mm de diamètre.

En revanche, pour les petites distances d(hkl), en rapprochant la partie mobile sur laquelle le film est fixé, du porte-échantillon, il est possible d'obtenir un diagramme beaucoup plus complet.

Porte-échantillon hermétique.

Celui-ci a été conçu de manière à éviter tout contact avec l'air ambiant. Deux fenêtres de milar collées à l'araldite assurent le passage des rayons X et délimitent une enceinte dont le volume avoisine 0,15 cm^3. La fenêtre externe permet de mettre en place l'échantillon. L'étanchéité de l'ensemble est assurée grâce à la présence d'un joint torique.

Plans films : qualités requises et mise en place.

Afin de limiter au maximum les temps d'exposition, nous avons utilisé un film « Ilford X ray cristallography » à haut contraste et haute sensibilité, qui permet des expositions de très courtes durées : les temps de pose varient en effet de 5 à 30 mm ; notons ici que c'est aux matériaux à forte teneur en eau que correspondent les temps les plus courts. Ce film, qui possède un grain fin, permet d'effectuer d'excellentes mesures.

b) *Préparation et présentation des échantillons à analyser, généralités*

Lorsque l'on veut étudier les mécanismes du retrait des matériaux argileux, il est indispensable de disposer d'une méthode qui puisse rendre compte de l'orientation des particules du matériau *en place*. Or, une telle mesure n'a de sens que si l'on arrive à éviter au maximum les risques de perturbations. Tous les modes de préparation habituels, comme le dépôt sur une lame ou encore la compression de pastilles de volume déterminé, sont donc à proscrire.

La technique qui a été retenue consiste à prélever, grâce à un système de coupe approprié, un échantillon d'épaisseur déterminée, et à le soumettre au faisceau de rayons X. A cet effet, le système de coupe adopté dépend de l'humidité de l'échantillon :

— utilisation d'un fil coupant pour les pâtes argileuses ;

— découpage à l'aide d'une scie fine pour les échantillons séchés à l'air et utilisés tel quel ;

— ou encore sciage avec une scie diamantée pour les échantillons imprégnés avec une résine.

Examinons maintenant quelles sont les modalités d'application de la méthode pour chaque conditionnement de l'échantillon.

Echantillons naturels humides.

Nous avons utilisé un fil coupant, en tungstène, de 2 ou 3/100e de mm, de façon à prélever un échantillon sans le perturber. Le fil est monté sur une pièce en duralumin

dont la partie inférieure comporte une face plane. Celle-ci fait un angle connu par rapport au fil (cf. fig. 5).

Ainsi l'échantillon à découper étant disposé sur une pièce métallique plane, il suffit de déplacer latéralement le fil pour découper une tranche, dont les deux bords sont parallèles.

Sur les argiles humides, ce procédé convient à partir du moment où les matériaux acquièrent une cohésion suffisante pour se laisser découper par un fil de faible section.

En revanche, pour des échantillons plus secs, situés par exemple au-delà de la limite de plasticité, la méthode n'est plus applicable.

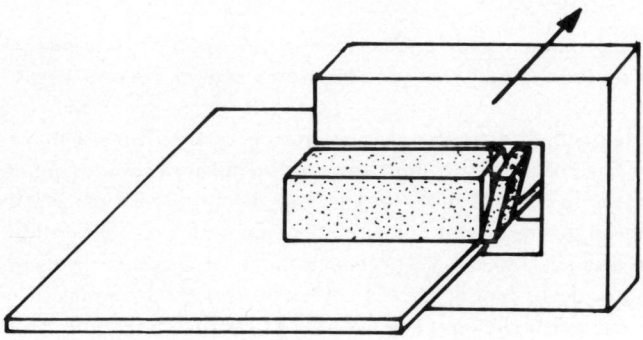


FIG. 5. — *Prélèvement d'un échantillon humide.*
Preparation of a wet sample.

Echantillons secs.

Lorsque les humidités deviennent inférieures à la limite de plasticité, le prélèvement peut être réalisé à l'aide d'une scie à métaux très fine. Toutefois, afin d'éviter l'effritement du matériau, le sciage devra s'appliquer à une tranche de plus forte épaisseur (1,5 à 2,0 mm). Ce n'est que dans un deuxième temps et en utilisant un abrasif (au corindon par exemple), qu'il est procédé à une usure *progressive* de l'échantillon jusqu'à l'obtention de l'épaisseur désirée, soit 300 à 500 μ.

Malgré toutes ces précautions, le travail reste assez difficile dès que le matériau s'effrite. C'est la raison pour laquelle, dès qu'un échantillon devient relativement fragile, il est préférable de procéder à une consolidation.

Echantillons imprégnés.

Après imprégnation et consolidation par l'intermédiaire d'une résine, les échantillons peuvent être aisément sciés et amincis juqu'à l'obtention d'une lame d'épaisseur déterminée.

Dans le cas de l'étude aux rayons X, ce mode de préparation présente plusieurs avantages : d'une part, on ne risque pas de destruction lors du sciage, et d'autre part, on contrôle plus facilement l'épaisseur de l'échantillon.

Nota : les essais effectués sur un matériau séché à l'air avec ou sans imprégnation, ont conduit à des résultats *identiques*. La présence de résine ne pose donc pas de difficultés particulières lorsque les échantillons sont en équilibre avec des humidités relatives $<$ 95 p. 100.

c) *Choix de la raie de référence* (1)

Les diagrammes de rayons X caractéristiques des minéraux argileux comprennent 2 sortes de réflexions : les raies 001 qui correspondent aux plans des feuillets (équidistances basales), et les raies hkO qui se rapportent aux plans du réseau cristallin.

En ce qui concerne les minéraux de la famille des smectites qui sont caractérisés par un empilement de type turbostratique et donc par un réseau bidimensionnel, les réflexions 001 se limitent généralement à la raie 001. En même temps, les raies hkO n'apparaissent que sous la forme de bandes, relativement larges, qu'on appelle bandes hk.

Pour les autres minéraux argileux, la raie 001 apparaît parfaitement, tandis que les ordres supérieurs peuvent être plus ou moins réduits suivant l'état de cristallinité de l'argile.

Ceci étant, le problème qui se pose consiste à choisir la ou les raies qui sont les plus dépendantes de l'orientation. Or, nous savons que les minéraux argileux ont tendance à s'orienter suivant le plan de leurs feuillets ; ce sont donc les raies 001 qui indiquent le mieux l'orientation des cristallites phylliteux au sein des échantillons étudiés.

D'après ce que nous avons vu précédemment, le choix de la réflexion est limité pour les minéraux de la famille des smectites puisqu'en pratique on ne dispose que de la raie 001. En revanche, pour les autres minéraux argileux, s'il est possible en théorie de retenir les raies 001, 002, 003, il vaut mieux, comme nous le verrons plus loin, choisir là aussi la raie 001.

d) *Etude des spectres d'argile orientée*

Comme cela a été précisé antérieurement, une argile orientée soumise à un faisceau de rayons X présente, dans certaines conditions, des anneaux de diffraction qui ne sont pas homogènes ; c'est en effet dans les directions des orientations préférentielles qu'apparaissent les intensités maxima.

Examinons tout d'abord quelle est la signification d'un spectre d'argile orientée et commençons par envisager la diffraction de cristallites occupant plusieurs sortes de positions.

α) *Diffraction par des cristallites d'argile.*

En considérant que le faisceau de rayons X incident fait avec un plan de référence choisi dans l'échantillon l'angle θ de Bragg pour la réflexion étudiée, 001 par exemple, on peut envisager deux situations différentes en ce qui concerne l'effet de l'orientation des cristallites d'argile sur l'énergie diffractée.

1) Les plans 001 des cristallites sont tous parallèles au plan de référence. Dans ce cas, tous les cristallites donnent naissance à un faisceau diffracté, quelle que soit leur orientation mutuelle dans ce plan (fig. 6*a*).

2) L'orientation des plans 001 des cristallites est quelconque par rapport au plan de référence. Dans ce cas, ne donnent lieu à un faisceau diffracté, que les cristallites

(1) Nous avons utilisé un rayonnement Cu kα qui permet de bonnes mesures pour les valeurs de θ faibles. Quant au rayonnement Co kα, il ne convient pas pour ce type de mesure du fait de sa trop faible énergie.

dont l'orientation est telle que la direction de leurs plans 001 fait l'angle θ de Bragg avec le faisceau incident ; ceci correspond aux directions des plans tangents à un cône ayant pour axe le faisceau direct et pour demi angle au sommet, l'angle θ (fig. 6*b*). Toutes les autres orientations des cristallites ne donnent pas naissance à un faisceau diffracté.

β) *Diffraction par agrégat d'argile orienté.*

Comme nous l'avons vu plus haut, les spectres de rayons X obtenus à partir d'argiles orientées conduisent à des anneaux D.S. hétérogènes. Examinons donc maintenant la signification des intensités maximum et minimum recueillies sur ce type de diagramme.

Pour définir convenablement l'orientation d'une argile, il faut d'abord choisir un plan de référence. Pour toutes nos études, l'orientation a été définie par rapport au plan (P) d'orientation principale : c'est celui qui correspond à l'orientation la plus fréquente des plans 001 des cristallites.

Si on dispose ce plan d'orientation *principale* par rapport au faisceau de rayons X de telle sorte qu'il fasse avec lui un angle θ, *toutes* les particules dont les plans 001 sont parallèles à ce plan vont diffracter en 2 θ (cf. fig. 6*a*). L'intensité diffractée sera alors maximum. Mais on voit aussi que cette position est une position *limite* ; en effet, parmi toutes les *autres* particules dont les plans 001 sont orientées en dehors du plan d'orientation principale, seules vont diffracter celles qui occupent les positions privilégiées par rapport au faisceau incident, c'est-à-dire celles qui correspondent à l'angle θ (comme cela est indiqué sur la figure 6*b*).

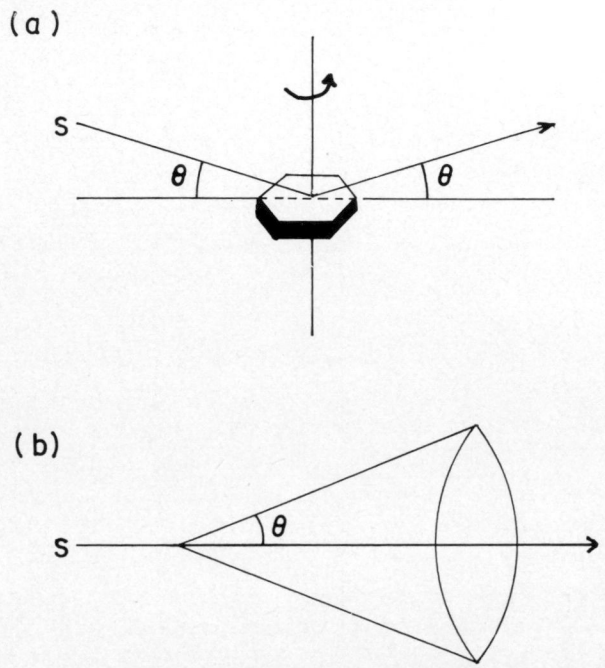


FIG. 6. — *Diffraction par un cristallite d'argile occupant deux sortes de position.*
X-ray diffraction from a clay particle lying into two different positions.

De ce fait, le diagramme de rayons X obtenu à partir d'une argile orientée n'est pas quantitatif au sens strict du terme, les intensités diffractées par les cristallites dont les plans 001 sont orientés en dehors du plan d'orientation principale étant sous-évaluées ; on ne peut donc considérer les intensités diffractées comme une mesure de la proportion des cristallites non orientés.

Au demeurant, nous avons la possibilité d'attribuer une signification aux diverses intensités diffractées, quant à l'orientation des particules.

En effet, en disposant l'échantillon de telle sorte que le plan de référence des particules fasse avec le faisceau de rayons X un angle θ, le plan de coupe de l'échantillon

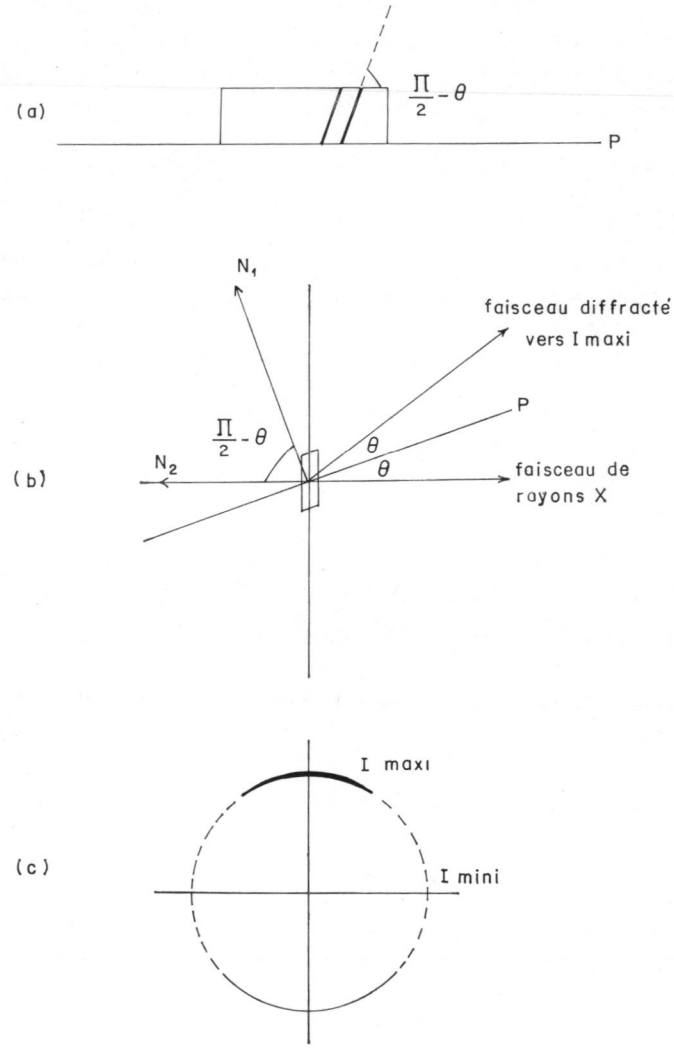


FIG. 7. — *Diffraction par un échantillon d'argile orienté quand le plan de référence fait avec le faisceau de rayons X un angle* θ.

Diffraction from an oriented clay sample. The incident beam makes angle θ *with the reference plane.*

doit être réalisé avec un angle $\frac{\pi}{2} - \theta$ par rapport au plan de référence qui est, dans notre cas, un plan parallèle au support de l'échantillon (fig. 7*a*).

Le plan de coupe étant disposé perpendiculairement au faisceau de rayons X, les particules parallèles au plan de référence ont leur normale en N_1 et vont diffracter en I maximum sur le demi-anneau supérieur (fig. 7*b* et *c*) dans un plan contenant le faisceau incident.

D'un autre côté, les particules dont la normale se projette suivant N_2 vont diffracter en I minimum et les particules dont la normale fait avec le faisceau incident un angle supérieur à $\frac{\pi}{2} - \theta$ ne peuvent pas donner un faisceau diffracté.

Nous voyons donc que pour le demi-anneau Debye Scherrer concerné, le domaine angulaire de diffraction des particules est limité à $\frac{\pi}{2} - \theta$. Il en résulte 2 conséquences :

1) Pour les argiles, il vaut mieux choisir la raie 001 que les ordres supérieurs, car le domaine angulaire d'orientation des particules étudié est plus grand pour un demi-anneau de diffraction ;

2) Quand θ est très petit comme c'est le cas pour les smectites, $\frac{\pi}{2} - \theta$ étant peu différent de $\frac{\pi}{2}$, le plan de coupe de l'échantillon peut être réalisé perpendiculairement au plan de référence, sans que dans la pratique les résultats soient modifiés.

e) *Densitométrie*

Il s'agit essentiellement d'un problème de mesure de la densité optique du film. Lorsque nous provoquons un noircissement léger de la pellicule (densité optique $\leqslant 1$), celle-ci est proportionnelle à l'exposition en tout point de la réflexion concernée ; par contre, au-delà de cette valeur, il est nécessaire de se référer à une courbe d'étalonnage.

Les films obtenus à partir d'argiles orientées présentent des anneaux hétérogènes et pour un même échantillon, l'intensité diffractée en chaque point de l'anneau dépend :

— de la quantité de matière soumise au rayonnement,
— du temps d'exposition,
— de l'orientation des particules par rapport au faisceau de rayons X.

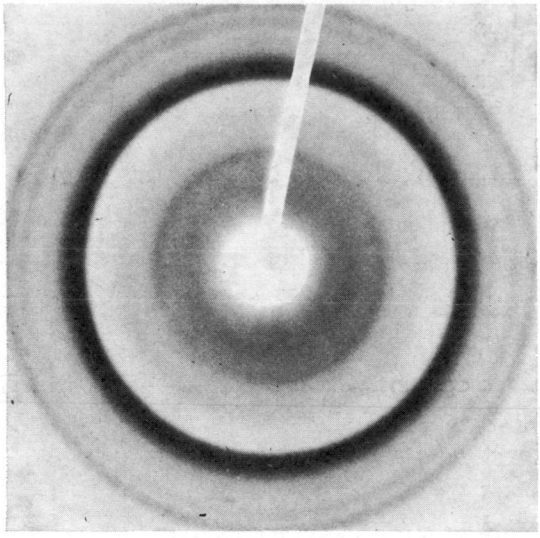
Comme nous l'avons vu dans la théorie, chaque point de la raie étant affecté du même coefficient d'absorption et la densité optique restant < 1, l'établissement de la courbe de densité optique n'implique pas de correction.

Toutefois, par suite des difficultés que l'on a à repérer le centre du film, il n'a pas été possible de densitométrer la raie point par point sur un demi-cercle. Nous avons donc travaillé par traversées successives de l'anneau, de 6° en 6° minimum.

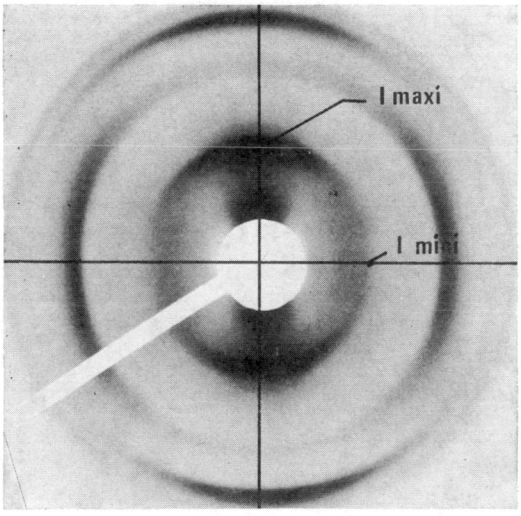
La densité optique maximum relevée en chaque section de l'anneau est reportée sur un graphique en vue de l'établissement de la courbe de densité optique.

f) *Présentation des résultats*

Nous montrons à titre d'exemple deux spectres obtenus à partir d'une kaolinite peu orientée et très fortement orientée (clichés 1*a* et 1*b*). Sur des spectres comparables les densités optiques relatives au demi-anneau de diffraction ont été relevées.



a)



b)

CLICHÉ 1. — *Spectres de rayons X obtenus à partir de la kaolinite,*
a) argile peu orientée, *b*) argile fortement orientée.
X-ray powder photographs obtained from kaolinite
a) non oriented clay particles, *b*) very well oriented clay particles.

Sachant que l'épaisseur de la tranche d'échantillon est variable et que la teneur en eau évolue au cours de l'expérience, les densités optiques absolues ne peuvent être prises en compte. En revanche, nous pouvons établir le rapport des densités optiques maximum et minimum, du fait qu'en tout point la raie concernée est affectée du même coefficient d'absorption.

Ainsi, le rapport R = I maximum/I minimum permet de comparer les spectres entre eux. Aussi, compte tenu de ce que nous avons indiqué antérieurement, un tel rapport est caractéristique de l'orientation ; mais celui-ci n'*est pas un rapport de proportionnalité*, car d'une part, les particules dont l'orientation est proche du plan de référence diffractent préférentiellement, et d'autre part la répartition des orientations au sein de l'échantillon obéit à une loi, qui est variable d'un échantillon à l'autre et d'une teneur en eau à une autre.

Au demeurant, sur un même matériau, et pour des hydratations variables, nous pouvons comparer le domaine angulaire de diffraction préférentielle.

L'étude statistique que nous avons effectuée sur un certain nombre de courbes simples des différentes argiles montre qu'il s'agit généralement de courbes d'allure

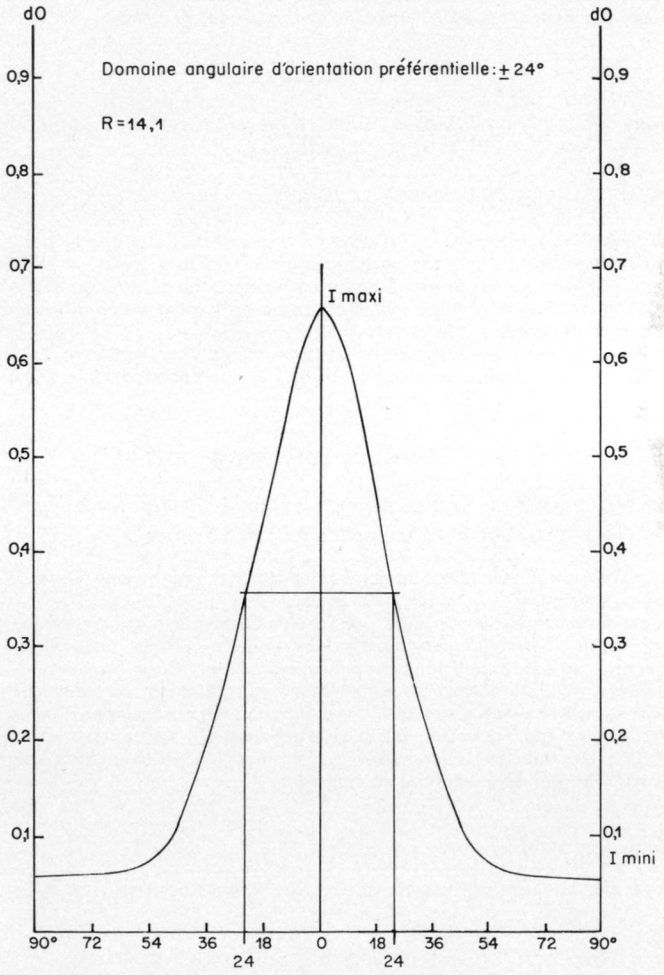


FIG. 8. — *Densités optiques relatives à un demi-anneau de diffraction relevées sur une kaolinite fortement orientée.*

Variation of the optical density observed along an half diffraction ring, for a very well oriented kaolinite sample.

gaussienne. Le domaine angulaire de diffraction préférentielle a été établi en prenant la largeur à mi-hauteur de la courbe (fig. 9).

Il convient de signaler toutefois, que le domaine de diffraction ne se confond pas complètement avec le domaine d'orientation, surtout si θ est grand ; le décalage se situe au niveau de I minimum.

Enfin, précisons que cette méthode n'est utilisable que pour des échantillons dont on a repéré à l'avance le plan d'orientation de référence : c'était d'ailleurs effectivement le cas dans nos expériences.

Reçu pour publication en mai 1978.

Remerciements

Je tiens à remercier MM. J. Mamy et G. Pédro (Station de Science du Sol de Versailles, I. N. R. A.) qui m'ont fait bénéficier de leurs conseils lors de la rédaction de cet article.

Summary

A technique for studying the orientation of the clay particles applicable to dry and moist samples

A technique for measuring the orientation of the clay particles based on X-ray diffraction has been established.

On an undisturbed clay sample a cross-section has been taken out of which a X-ray diagram is obtained through transmission. When the particles are oriented in a preferential direction, the intensity along the Debye-Scherrer rings presents maximum values ; the densitometry of a half-ring corresponding to the 001 line allows to plot a curve of optical density from which a preferential orientation index and zone can be deduced.

This method may be used on clays having water contents corresponding to suctions $\geqslant$ pF1 ; it was tested on illite, kaolinite and montmorillonite and it has contributed to the study of the evolution of clay organization during shrinkage.

Zusammenfassung

Technik fur die Untersuchung der Richtung der Tonteilchen auf trockenen oder feuchten Proben

Es wurde eine Technik für die Messung der Tonteilchenrichtung ausgearbeitet, die auf der Roentgenstrahlenbeugung beruht.

Auf einer nicht gestörten Tonprobe wird eine Scheibe entnommen,aus welcher ein Diagramm von Roentgenstrahlen durch Übertragung erzielt wurde. Wenn die Teilchen nach einer Vorzugsrichtung orientiert sind, erreicht die Intensität längs der Debye-Scherrer Ringe maximale Werte ; die Dichtemessung eines der 001 Linie entsprechenden Halbrings ermöglicht es, eine Kurve der optischen Dichte aufzuzeichnen, woraus man einen Richtungsindex und ein bevorzugtes Richtungsgebiet ableitet.

Diese Methode kann auf Tonerden mit Wassergehalten ab pF1 angewandt werden ; sie wurde auf Illit-, Kaolin- und Montmorillonitmaterialien getestet und hat es ermöglicht, die Entwicklung der Tonanordnung während der Schrumpfung zu verfolgen.

РЕЗЮМЕ

Технология изучения ориентации глинистых частичек, при применении сухих, или влажных образцов.

Д. ТЕССЬЕ.

Автор разработал технологию определения ориентации глинистых частичек, основанную на диффракции рентгеновских лучей.

С помощью трансмиссии, с ломтика взятого от образца нетронутой глины, снимается диаграмма рентгеновских лучей. Когда частички ориентированы в предпочтительном направ-

лении - интенсивность вдоль колец Деби-Шеррера будет максимальной ; денсиометрия половины кольца соответствующего линии 001 позволяет вывести кривую оптической плотности, благодаря которой можно получить показатель ориентации и сферу предпочтительной ориентации.

Этот метод применяется на глинах, содержание воды в которых соответствует величинам начиная от pF1 ; он был испробован на иллитах, каолинитах и монтмориллонитах, и позволил проследить эволюцию организации глин в течении явления усадки.

Références bibliographiques

BRINDLEY G. W., 1953. An X-ray method of studying orientation of micaceous minerals in shales, clays and similar materials. *Mineral. Mag.*, **30**, 71-78.

BRINDLEY G. W. et KURTOSSY S., 1961. Quantitative determination of kaolinite by X-ray diffraction. *Am. Mineral.*, **46**, 1205-1215.

LIPMANN F., 1970. Functions describing preferred orientation in flat agregates of flake-like clay minerals and other axially symmetric fabric. *Contr. Mineral and Petrol*, **25**, 77-94.

MARTIN R. T., 1966. Quantitative fabric of wet kaolinite. *Clays and clay Minerals*, 271-287.

TAYLOR R. M. et NORRISH K., 1966. The measurement of orientation distribution and its application to quantitative X-ray diffraction analysis. *Clays and clay Minerals*, 6, 127-142.

VAN DER MAREL H. W., 1962. Quantitative determination of kaolinite by X-ray diffraction. *Am. Mineral.*, **46**, 1205-1215.

Ann. agron., 1978, **29** (2), 209-210.

Chronique des livres

La terre, les eaux, l'atmosphère. Bureau des Longitudes, Encyclopédie scientifique de l'univers. Gauthier-Villars, Paris, 232 p., 1977.

Les lecteurs qui appréciaient les articles généraux inclus dans chaque volume de l'Annuaire du Bureau des Longitudes seront heureux d'apprendre que maintenant la partie à caractère encyclopédique fait l'objet d'un volume séparé.

Le premier ouvrage paru surprend agréablement par sa présentation : grand format, couverture cartonnée, typographie élégante, graphiques, illustrations.

Ce volume comprend deux parties :

La première concerne la géodésie, la relation de la terre, les marées terrestres, la sismologie, les plaques lithosphériques et la tectonique globale, le champ magnétique terrestre, la constitution physique de la terre.

La seconde porte sur les marées, les courants marins, la houle et les vagues, l'atmosphère, la météorologie, la circulation des eaux, les neiges et les glaciers.

Les articles, rédigés chacun par un spécialiste, s'adressent à un large public du niveau d'études secondaires ; mais les lecteurs de formation supérieure y trouvent aussi des précisions, références, formules, ordres de grandeur intéressants. L'ensemble des cinq volumes constituera une Encyclopédie Scientifique de l'Univers de qualité.

R. B.

DUMON R. — *Energie solaire et stockage d'énergie.* Collection « Les objectifs scientifiques de demain ». Ed. Masson, Paris, 1978, 134 p.

Le caractère « dilué et intermittent » de l'énergie solaire pose de façon impérative les problèmes techniques et économiques du stockage d'énergie.

Dans un premier temps cet ouvrage présente les différents types de stockage d'énergie : pompage hydraulique, accumulateurs de vapeur sous pression, air comprimé, stockages inertiel ou électromagnétique, accumulateurs chimiques ou électriques, hydrogène. Puis l'auteur discute plus en détail les différentes méthodes disponibles selon le niveau thermique de l'énergie à stocker (accumulateurs de chaleur) :

— basse température : eau chaude, sels fondus, matériaux solides ;
— température modérée : fluides colporteurs, produits minéraux (soude, potasse) ;
— haute température : métaux et sels fondus, réfractaires, carbone ou graphite.

Une quinzaine de pages est consacrée à la production et au stockage de l'énergie solaire par photosynthèse et à son éventuelle utilisation : fermentation, pyrolyse, hydrogénation.

Cet ouvrage s'adresse à un public très large ; il est complété par une bibliographie comprenant de nombreux titres français ; un index alphabétique en rend la consultation très facile.

R. B.

POSPISILOVA J. et SOLAROVA J. — *Water in plants bibliography*, Volume 1, 1975, Dr. W. Junk Publish. The Hague, 1977, 88 p.

Le domaine d'étude des relations plante-eau ne disposait pas encore, comme cela existe et depuis longtemps parfois dans d'autres disciplines, d'une revue périodique donnant la bibliographie correspondante. Cette lacune est maintenant comblée grâce à l'effort de chercheurs du Laboratoire des relations plante-eau de l'Institut de Botanique Expérimentale de l'Académie des Sciences de Tchécoslovaquie à Prague. Rappelons que ce sont des chercheurs du Laboratoire de Photosynthèse du même Institut, Catsky et Sestak qui ont lancé, il y a quelques années une publication similaire pour la photosynthèse.

La bibliographie comprend les références couvrant tout le domaine des relations plante-eau depuis les considérations théoriques sur l'état de l'eau dans les cellules et son transport dans les membranes jusqu'à la résistance à la sécheresse et aux aspects physiologiques de l'irrigation. En plus des références aux documents entièrement consacrés aux relations plante-eau figurent celles des documents couvrant d'autres champs mais incluant aussi des données sur les états d'hydratation ou sur les transports hydriques (transpiration, absorption etc...) ainsi que ceux contenant des informations méthodologiques intéressantes. La bibliographie est faite d'une part à partir du dépouillement des plus importants périodiques et ouvrages scientifiques, d'autre part à partir de revues moins importantes, d'articles ronéotypés, de contributions à des symposia divers, etc... dans la mesure où les sélectionneurs en ont la connaissance grâce aux envois de tirés à part des auteurs.

Les références numérotées (de 1 à 979 pour ce premier volume) sont classées par ordre alphabétique des auteurs. Suit :

— un index auteur ;

— un index matière. Ce dernier a été établi non seulement à partir du titre, des mots clés et des résumés, mais aussi du contenu de tout l'article ;

— un index par plantes où figurent les plantes cultivées importantes et un certain nombre de taxons.

Cette bibliographie qui paraîtra maintenant chaque année constitue un outil extrêmement précieux pour tous ceux qui s'intéressent aux relations plante-eau.

P. C.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 10C. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 10-1978

Dépôt légal : 4e trimestre 1978. N° d'impression : 25751

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1978	France	Étranger	Le N°
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOLOGIE-ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	85 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	300 F	330 F	65 F
ANNALES D'HYDROBIOLOGIE (2)			

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

(2) Les *Annales d'Hydrobiologie* cessent de paraître à partir de 1978.

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 64 F — Étranger sauf R. F. A. : 75 F
— Le numéro : France : 21 F — Étranger sauf R. F. A. : 27 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **52,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **35,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **150,00 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **150,00 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **85,00 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **58,85 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **120,00 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition INRA-CNRS.
549 p., 1973 ..... **160,50 F**

Recherches acridiennes à Madagascar.
262 p., 1972 ..... **80,00 F**

IVe Conférence du groupe international d'étude des virus et des maladies à virus de la vigne, Colmar 16-18 juin 1970.
211 p., 1972 ..... **60,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1978, **29** (2).

Table des matières

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE, F. A. DAUDET. — Oscillations journalières de la profondeur des nappes en l'absence de précipitations 111

J. L. BALLIF. — Porosité de la craie. Appréciation de la taille et de la répartition des pores 123

J. SERVANT. — Utilisation d'un modèle de désalinisation en sol humide 133

H. METTAUER, Y. TUAL, R. HAEFLINGER, A. P. CONESA, R. TRENDEL. — Influence des propriétés physiques et mécaniques du sol sur la morphologie et le rendement en racine de la betterave à sucre 147

C. DUTHION. — Composition en acides organiques des racines de plantes soumises à une période d'excès d'eau à différents stades de végétation 169

A. MORISOT. — Répartition des éléments fertilisants dans les sols de serres florales du midi de la France (œillets et rosiers) 177

D. TESSIER. — Technique d'étude de l'orientation des particules argileuses utilisable sur des échantillons secs ou humides 193

Chronique des livres 209

Contents

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE, F. A. DAUDET. — Diurnal oscillations of the water table level during dry periods 111

J. L. BALLIF. — Chalk porosity. Estimation of the pore size and distribution 123

J. SERVANT. — Using a desalinization model in saturated soils 133

H. METTAUER, Y. TUAL, R. HAEFLINGER, A. P. CONESA, R. TRENDEL. — Influence of the physical and mechanical properties of the soil on the sugar beet morphology and root yield 147

C. DUTHION. — Organic acid composition of plant roots subjected to a period of water excess at different vegetative stages 169

A. MORISOT. — Nutrients distribution in greenhouses soils of the south of France (carnations and roses) 177

D. TESSIER. — A technique for studying the orientation of the clay particles applicable to dry and moist samples 193

Books reviews 209

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 8-036002-5

annales agronomiques

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 3

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron. ANAGA9 29 (3) 209-310 (1978)

FR ISSN 0003-3839.

AAG
29.3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— M. HALLAIRE, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— J. PONCHET, Chef du Département de Pathologie végétale, 06602 Antibes.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie,

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès. Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie. Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (3), 209-222.

Présentation d'une étude analytique de l'advection

III. — Vérification expérimentale du modèle

B. ITIER, A. PERRIER et G. GOSSE

Station de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles

Résumé

A la suite d'une étude analytique de l'advection due aux changements de température et d'humidité de surface (Itier et Perrier, 1976 I) et après avoir analysé les applications de cette étude à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration (Itier et Perrier, 1976 II), nous présentons ici le contrôle expérimental du modèle réalisé sur sol nu irrigué au cours de la sécheresse de l'été 1976.

Ce contrôle porte sur l'évolution des profils verticaux de température d'une part et sur l'évolution des flux de surface d'autre part, qu'il s'agisse du flux de vapeur d'eau mesuré à partir de pesées localisées ou du flux de chaleur sensible obtenu par la méthode aérodynamique à partir des profils de température.

Le bon accord observé entre prévisions et mesures, à quelques restrictions près discutées au paragraphe III, B, permet d'appliquer les relations approchées fournies précédemment (Itier et Perrier II), pour la conduite de l'irrigation sur périmètre de dimensions réduites.

Liste des symboles

A : Coefficient.
B : Coefficient.
C : Concentration.
C_p : Chaleur massique de l'air.
g : Accélération de la pesanteur.
k : Constante de Von Karman $\sim$ 0,4.
L : Longueur de Monin-Obukhov.
M : Masse molaire de l'eau.
P : Pression partielle de vapeur d'eau.
R : Constante des gaz parfaits.
T : Température.
u_* : Vitesse de frottement.
x : Distance horizontale.
X : Dimension dans le sens du vent.
z : Hauteur.
z_0 : Paramètre de rugosité.
ϕ_{adv} : Flux advectif.
Δ : Ecart entre zone aval et zone amont : exemple ΔT.
0 : Indice de surface : exemple ΔT_0.
$\mu_{opt.}$: Rapport x/X.

I. — Introduction

Dans un premier article (Itier et Perrier, 1976 I), nous avons analysé l'évolution des concentrations (chaleur, vapeur d'eau, ...) et des flux après une variation des caractéristiques de surface (température, humidité, ...). Les résultats obtenus nous ont permis (Itier et Perrier, 1976 II) d'appliquer cette étude à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. A côté des facteurs habituellement retenus (rayonnement, température et humidité de l'air, humidité de surface), nous avons été amenés à préciser l'importance de la dimension des parcelles et du contraste (thermique ou hydrique) avec celles qui les entourent. Nous avons, d'autre part, insisté sur la notion de flux moyen sur une parcelle et sur les méthodes permettant de le déterminer.

Nous présentons dans cet article les résultats d'une vérification expérimentale du modèle, qui est évidemment indispensable à la validation de ses conclusions.

II. — Conditions d'expérience

L'expérience a eu lieu en septembre 1976 au domaine expérimental de La Minière (10 km Sud Versailles) pendant la dernière période de la sécheresse de 1976. Le domaine est situé sur un plateau limoneux dégagé sur lequel, cette année là, l'essentiel des surfaces avoisinantes avait été planté en blé. Au mois de septembre, la quasi-totalité des terres, jusqu'à une distance de 1 à 2 km dans les secteurs Nord-Ouest-Sud-Ouest et Sud-Ouest-Sud-Est, était constituée de sol nu présentant un mulch de plusieurs centimètres en raison de la sécheresse (cf. fig. 1). Pour effectuer la vérifica-

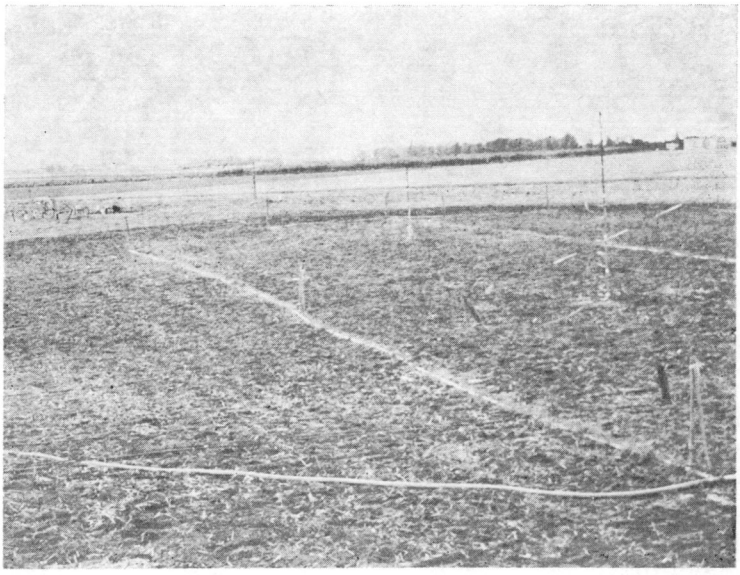


FIG. 1. — *Photographie de la zone d'expérience.*
Experimental field photograph

tion expérimentale, nous avons irrigué une parcelle de sol nu de 60 m sur 50 m sur laquelle l'ensemble des mesures a pu être réalisé lorsque le vent était de secteur Ouest-Nord-Ouest à Sud-Sud-Est (cf. fig. 2). La vérification a porté sur trois points :

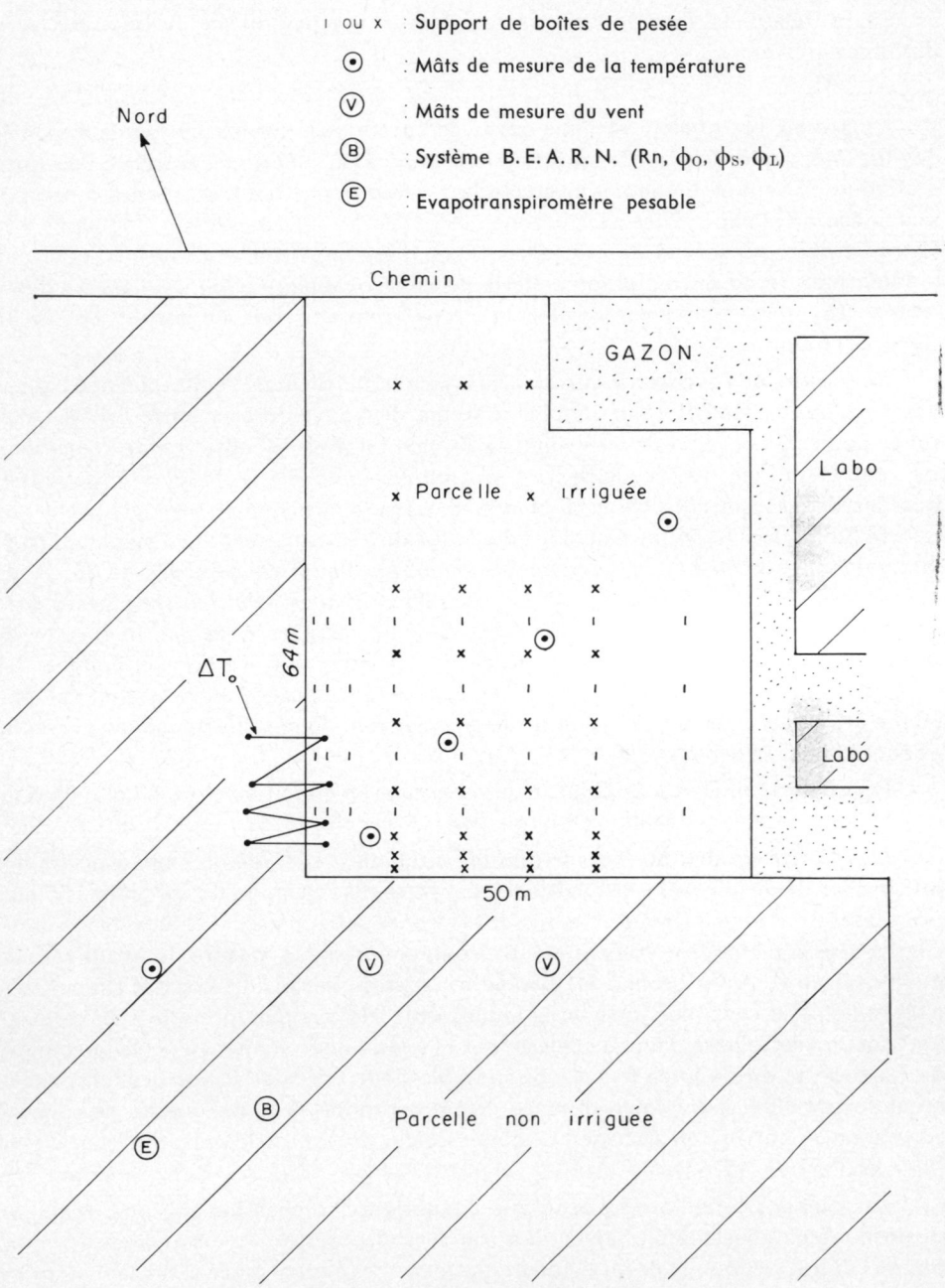


FIG. 2. — *Plan du site expérimental.*
Plan of the irrigated area with its surroundings.

1) Evolution dans la direction du vent des profils verticaux de température.

2) Evolution de l'évaporation de surface en fonction de la distance au bord d'attaque du vent.

3) Evolution du flux de chaleur sensible en fonction de la distance au bord d'attaque du vent.

Le premier point a été vérifié à partir de quatre mâts sur lesquels étaient montés des thermocouples Cu-Ct. Ces mâts étaient disposés à différentes distances du bord d'attaque du vent et, à chaque niveau (douze niveaux par mât), on mesurait directement l'écart de température avec la zone amont (sèche) sur laquelle un cinquième mât (dix-huit niveaux) servait de référence. L'écart de température de surface était par ailleurs mesuré au moyen d'une batterie de thermocouples Cu-Ct dont les soudures étaient très légèrement enfouies dans la terre (1 mm environ), de part et d'autre du bord d'irrigation.

La mesure de l'évapotranspiration ET(x) étant difficilement réalisable, nous avons essayé d'utiliser un dispositif simple, constitué de boîtes dont la perte en eau était suivie au moyen de pesées à intervalles de 20 mn à 1 h selon la constance de la direction du vent. Pour cela, le périmètre irrigué avait été quadrillé de telle sorte qu'il était possible de disposer dans le sens S-N et W-E, selon la direction du vent, cinq séries de quinze boîtes dont la distance au bord d'attaque du vent augmentait de façon approximativement géométrique. Il s'agissait de boîtes plastiques cylindriques de 15 cm de diamètre et de 2 cm de profondeur. En cours d'expérience, elles étaient placées dans des boîtes extérieures préalablement disposées de manière à ce que la surface de terre des boîtes de mesure soit au niveau du sol. Pour une expérience donnée, ces boîtes étaient remplies de terre saturée en eau, pesées, placées sur le terrain pendant 30 mn à 1 h puis repesées ; l'évolution du poids devant donner l'évaporation moyenne pendant l'intervalle de temps.

Parallèlement, l'évaporation sur sol nu non irrigué était obtenue au moyen d'un dispositif automatique de bilan d'énergie (Perrier et coll., 1975).

L'évolution du flux de chaleur sensible a, quant à elle, été obtenue à partir des différences de gradients verticaux de température au voisinage du sol entre les mâts positionnés sur zone irriguée et le mât de référence sur zone sèche. Nous avons, pour cela, utilisé la méthode aérodynamique ce qui a nécessité la mesure du profil vertical de vitesse du vent. Ce profil a été obtenu à partir de deux mâts portant chacun huit anémomètres à coupelles (Casella et Lambrecht). Notons que la mesure de ce profil vertical de vitesse permettant de déterminer la vitesse de frottement u_* et le paramètre de rugosité z_0 est de toute façon indispensable pour effectuer la vérification expérimentale car d'une part, toute distance doit être rapportée au paramètre de rugosité z_0 et d'autre part u_* est nécessaire pour le calcul du contraste entre les deux zones (Itier et Perrier, 1976 I).

Lorsque des conditions favorables à l'expérience se présentaient, une irrigation de 30 mn était effectuée au moyen de sprinklers disposés à une distance de 10 m les uns des autres ; à la suite de quoi, tandis que les boîtes étaient placées sur leur support, les enregistrements du vent et de la température étaient effectués de façon continue pendant 30 mn, des moyennes étant calculées toutes les 10 mn.

III. — Résultats expérimentaux. Discussion

A. — *Evolutions des profils microclimatiques*

Nous redonnons en figure 3*a* (cf. Itier et Perrier, 1976 I) l'ensemble des courbes permettant de calculer la différence de concentration $\Delta C(z, x)$ dans l'air entre un point situé à une distance x du bord et n'importe quel point de la zone amont, pour une

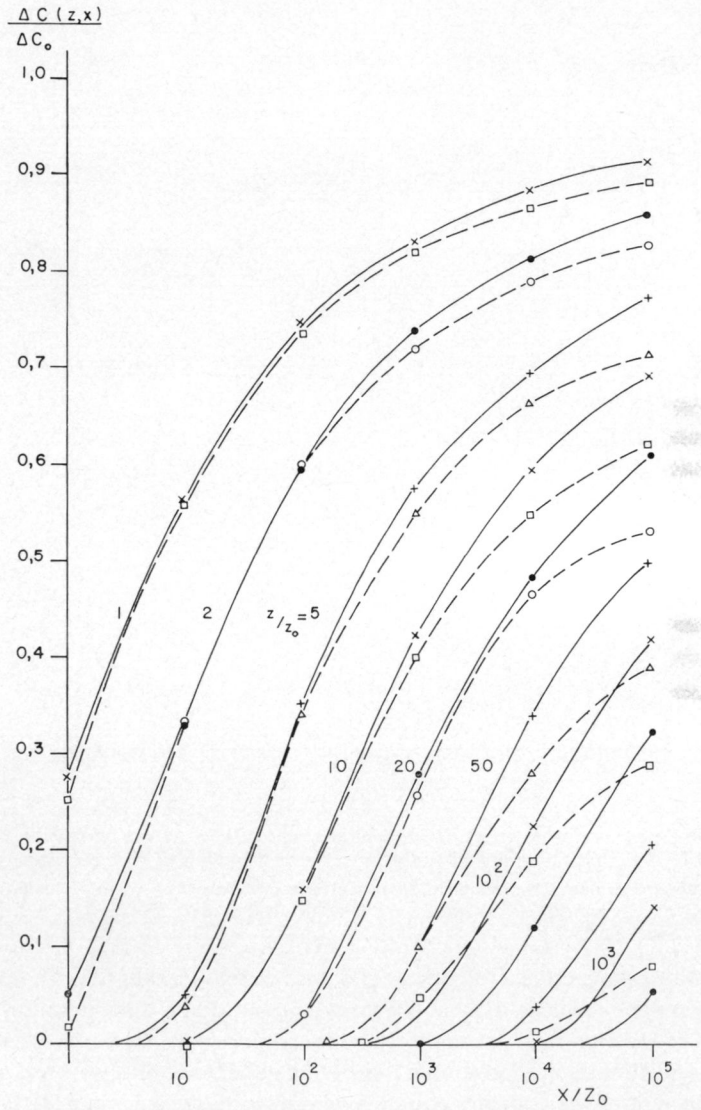


FIG. 3*a*. — *Evolution théorique de l'écart relatif de concentration en fonction de la hauteur et de la distance au bord d'attaque au vent,* (------ Taylor, 1970 modifié, ——— Itier et Perrier, 1976).

Evolution with height z and distance from the leading edge X of the concentration (heat, water, vapor, ...) difference ΔC *betwen downwind and upwind zone* (------ Taylor, 1970 modified, ——— Itier, Perrier, 1976).

même hauteur z, en fonction de l'écart de concentration de surface entre les deux zones ΔC_0 et du paramètre de rugosité de ces zones z_0. Dans le cas de l'expérience, cet écart de concentration correspond à l'écart de température de l'air (concentration de chaleur) rapporté à l'écart de température de surface.

Nous avons porté en figure 3*b*, les valeurs trouvées pour un rapport z/z_0 égal à 100 (z compris entre 20 et 50 cm selon les valeurs de z_0) ainsi que les courbes théoriques pour $z/z_0 = 50$, $z/z_0 = 100$ et $z/z_0 = 200$. Compte tenu de la variation de z_0 et comme

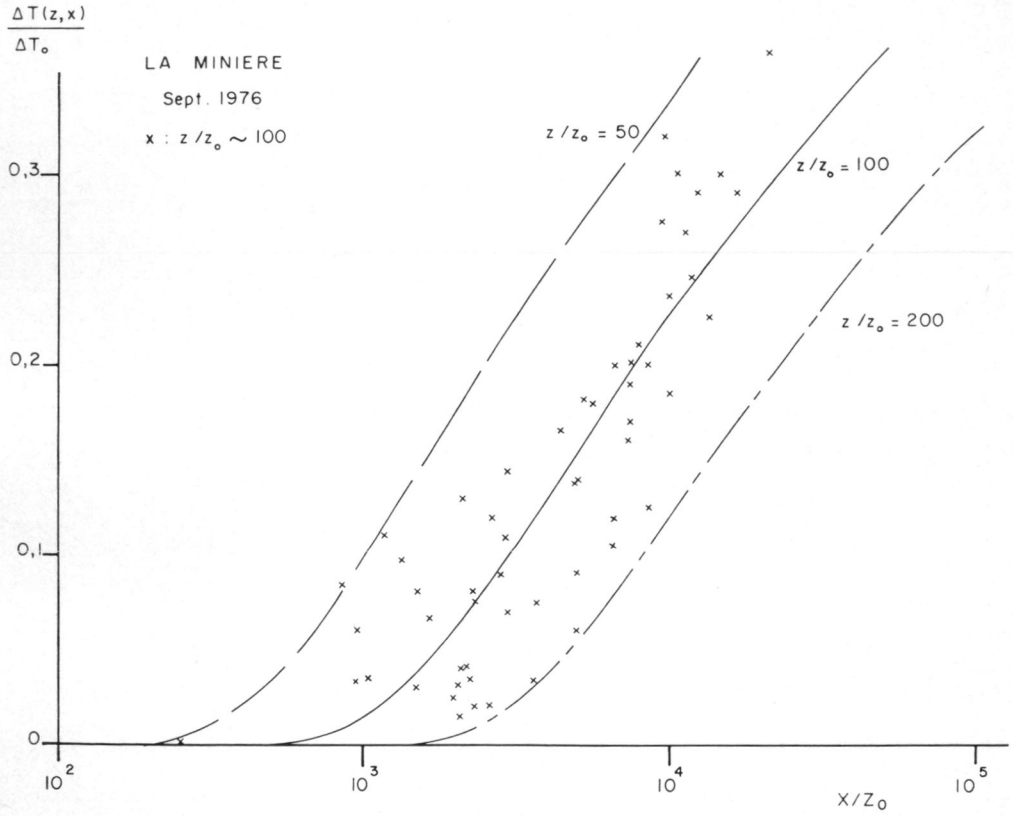


FIG. 3*b*. — *Valeurs mesurées de l'écart relatif de concentration, à une hauteur de* 100 z_0, *comparées avec les courbes théoriques.*

Measured values of the relative difference of concentration at $z = 100\ z_0$ *compared to theoretical values at* $z = 50\ z_0$, $100\ z_0$ *and* $200\ z_0$.

les capteurs de température étaient placés à des hauteurs fixées (20, 30, 40, 50 cm, ...), les valeurs obtenues pour $z/z_0 = 100$ proviennent d'une interpolation obtenue à partir d'une régression sur l'ensemble des valeurs mesurées, les hauteurs étant portées en échelle logarithmique. L'ensemble des points expérimentaux se situe autour de la courbe théorique et les courbes pour les valeurs double et moitié de z (200 et 50) bornent toujours ces valeurs. Il semble donc qu'à ce niveau, il y ait un bon accord entre théorie et expérience compte tenu de la difficulté de mesure des faibles différences de températures ($\Delta T_0 \sim 5$ à 10°, $\Delta T/\Delta T_0 = 0{,}01$ correspond à $\Delta T \sim 0{,}05$ à 0,1 °C c'est-à-dire à une mesure de 2 à 4 10^{-6} volts avec des thermocouples Cu-Ct).

Il convient toutefois de signaler que l'ensemble des résultats expérimentaux semble indiquer que les écarts relatifs $\Delta T/\Delta T_0$ sont légèrement plus faibles que ceux indiqués par le modèle analytique pour les valeurs de z/z_0 inférieures à 100 et plus forts pour les valeurs supérieures. Ainsi, les valeurs obtenues à $z/z_0 = 20$ paraissent centrées sur la courbe théorique $z/z_0 \sim 40$ alors que celles obtenues à $z/z_0 = 500$ le seraient sur une courbe théorique $z/z_0 \sim 300$. Les conditions expérimentales (mât de 3 m de hauteur) et les dimensions de la parcelle irriguée ne nous ont pas permis de poursuivre les comparaisons au-delà de $z/z_0 = 5\,10^2$ et de $x/z_0 = 2\,10^4$.

B. — *Evolution de l'évaporation sur la zone irriguée*

Nous redonnons en figure 4*a* (cf. Itier et Perrier, 1976 I) l'ensemble des courbes théoriques obtenues par divers chercheurs et permettant de déterminer l'évolution, en fonction de la distance relative au bord d'attaque x/z_0, de l'écart de flux de surface ($\phi_{adv}(x)$) entre la zone amont et la zone aval, rapporté à un flux de référence. Ce dernier est proportionnel à l'écart de concentration surfacique ΔC_0 et à la vitesse de frottement u_*. Notons que l'écart de concentration hydrique ($\Delta C_0 = M\Delta P_{H_2O}/RT$) est approximativement égal à l'écart de concentration thermique ($\Delta C_0 = \rho Cp\ \Delta T_0$), ces grandeurs étant comptées en Joules m^{-3}.

La figure 4*b* montre les résultats obtenus au cours des expériences durant lesquelles le vent est resté suffisamment constant en amplitude et en direction pour que les moyennes sur une heure puissent avoir une signification. Le contrôle de l'écart d'évaporation pose un problème essentiellement lié à la signification des pesées. Les fluctuations des diverses courbes, correspondant chacune à une expérience donnée, fournissent une idée de l'imprécision sur le rapport $\phi_{adv}/\rho Cp\ ku_*\ \Delta T_0$ que l'on peut fixer à 0,03, ce qui pour les conditions moyennes d'expérience ($u_* \sim 0{,}3$ m/sec et $\Delta T_0 \sim 10^o$) correspond à un écart de flux de l'ordre de 45 Wm^{-2}, c'est-à-dire à une différence de 1 g dans la pesée. Le décalage que l'on constate entre les courbes peut, quant à lui, être relié à l'imprécision sur la mesure de l'évapotranspiration sur la zone amont puisque la valeur de ϕ_{adv} est obtenue par différence des deux évaporations.

L'ordre de grandeur des valeurs obtenues est assez voisin de celui prévu par le modèle puisque l'écart relatif maximum à la courbe théorique est de l'ordre de 30 p. 100. Il semble toutefois que la pente de décroissance de l'écart de flux soit légèrement inférieure à celle calculée. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le modèle traite la vapeur d'eau et la chaleur comme des constituants passifs. Or, il est aujourd'hui bien établi que l'inversion du profil de température qui se produit lorsque l'air aborde la zone irriguée plus froide tend à réduire l'intensité des échanges turbulents au voisinage du sol (par le jeu des corrections de stabilité), cet effet devant diminuer l'écart de flux près du bord d'attaque (partie gauche de la figure). Cette réduction s'accompagnera d'une diminution de l'enrichissement de l'air en vapeur d'eau par rapport à ce que prévoit le modèle, laquelle engendrera une « demande » plus forte pour les zones plus éloignées, ce qui pourrait expliquer la différence positive entre mesure et théorie sur la partie droite de la figure. Pour arriver à un meilleur accord entre expérience et théorie, il faudrait compléter le modèle en tenant compte de l'effet de l'advection sur la turbulence. Or, s'il existe des lois de correction permettant de relier le coefficient d'échange à la structure thermique de l'atmosphère au moyen

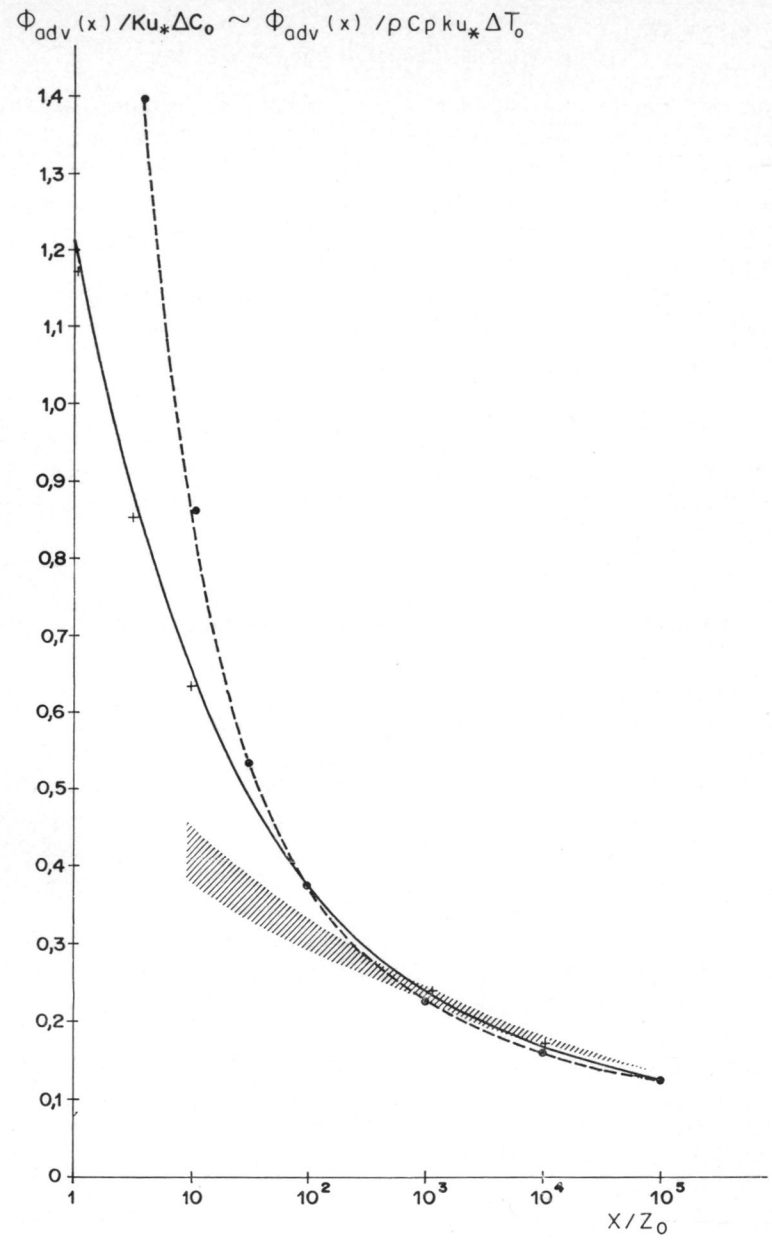


FIG. 4*a*. — *Evolution théorique du flux advectif de surface en fonction de la distance au bord.*

Evolution of the advective flux with distance from the leading edge as obtained by different models.

—— ITIER PERRIER (1976 I)

++ Valeurs obtenues par TAYLOR (1970)

•• Valeurs calculées à partir de la sous-couche limite interne donnée par ELLIOT (1958) — SEGUIN (1975)

▨ Zone de variations, pour différents zo (0,66 à 2,35 cm) des valeurs calculées à partir des résultats présentés par PERRIER (1974)
(MODELE PHILIP 1959)

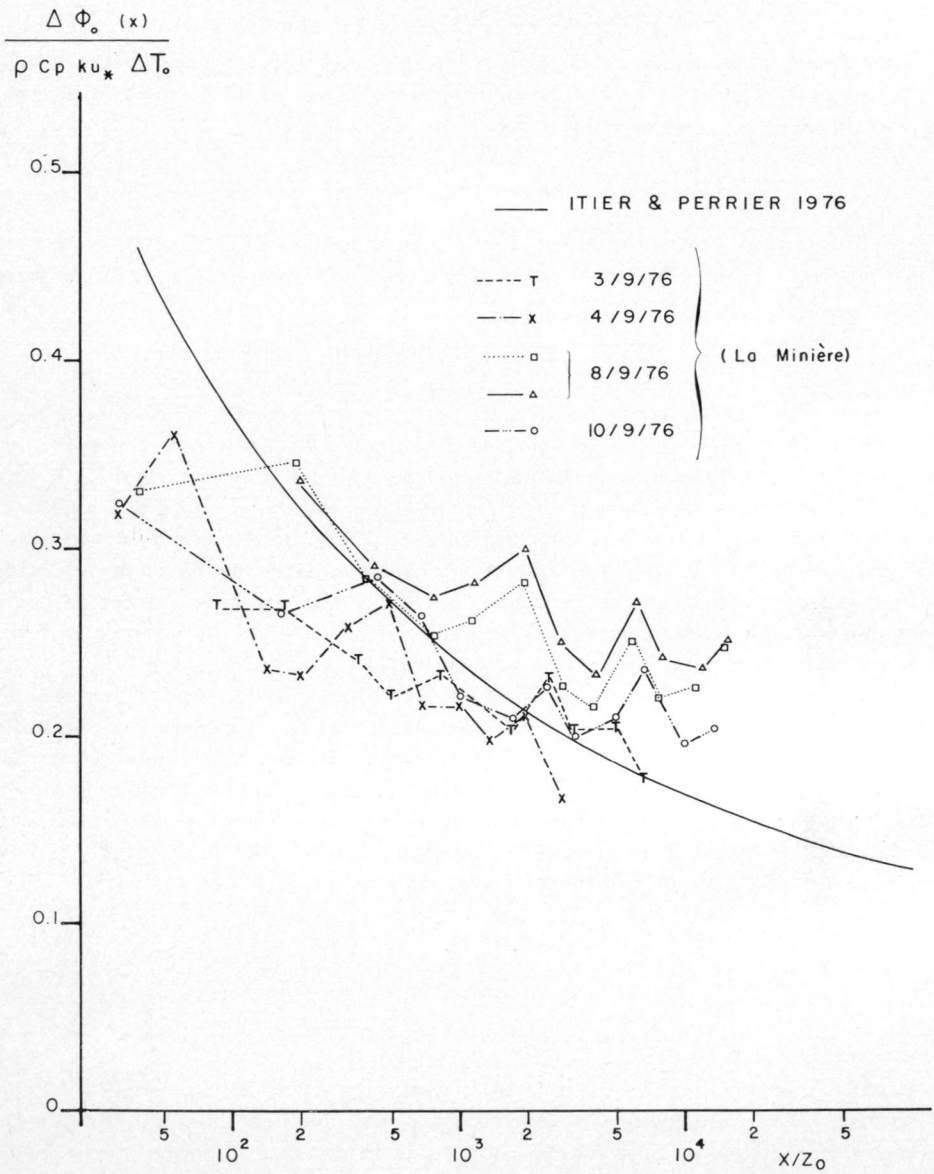


FIG. 4*b*. — *Résultats des mesures sur l'évolution de flux advectif d'évaporation.*
Measured water vapour advective flux.

du rapport entre la hauteur et la longueur de Monin-Obukhov (Businger *et al.*, 1970), ces lois ne sont valables que dans la couche à flux conservatif c'est-à-dire en l'absence d'advection. Le seul calcul qui puisse être fait est pour l'instant celui de l'influence d'une structure thermique donnée identique sur zone amont et zone aval (advection non énergétique) sur la diffusion d'un constituant passif tel que le CO_2 ou des aérosols (article à paraître).

C. — *Evolution du flux de chaleur sensible*

L'évolution du flux advectif de chaleur sensible a été calculée à partir de la vitesse de frottement et de la différence de pente des profils verticaux de température sur zone irriguée et sur zone amont. En effet :

$$\phi_{adv}(x) = \phi(x) - \phi_{Amont}(x) = \rho C_p \, K(z) \frac{\partial}{\partial z} (\Delta T(z, x)).$$

Si l'on se place assez près du sol (sur 1/10 de la hauteur de la couche limite — cf. Itier et Perrier, 1976 I) le flux est quasi conservatif et si l'on exprime $K(z) = ku_*(z + z_0)$, alors :

$$\phi_{adv}(x) = \rho C_p \, ku_* \, \Delta T_0 \left\{ 1 - \frac{\Delta T(z, x)}{\Delta T_0} \right\} \Big/ \text{Log} \frac{z + z_0}{z_0}.$$

L'ensemble des résultats obtenus a été porté sur la figure 4*c* où l'on a également reporté la courbe théorique de la figure 4*a*. Chaque point représente les valeurs obtenues à partir de moyennes d'écarts de température sur 10 mn. Il ne s'agit donc pas, comme pour la mesure de l'écart d'évaporation, de la différence de deux mesures indépendantes mais d'une mesure différentielle, ce qui améliore d'autant la précision comme on peut le constater par comparaison des figures 4*b* et 4*c*. L'accord entre mesure et théorie semble très bon tant en ce qui concerne l'ordre de grandeur que la pente de décroissance. Il faut toutefois préciser que le mode de contrôle contient en lui-même une des lois de base du modèle étant donné que l'on a utilisé la méthode aérodynamique pour le calcul des flux. On a toutefois essayé de remédier le plus possible aux inconvénients provenant de la non conservativité verticale des flux en régime advectif et de l'influence de la structure thermique des basses couches atmosphériques sur les échanges turbulents (correction de stabilité appliquée au coefficient de diffusivité turbulente), en se plaçant le plus près du sol possible ($z/z_0 < 10^2$) et dans des conditions correspondant à celles pour lesquelles Taylor (1970) ne trouve pas de différences entre constituants passifs et actifs ($z/L < 10^{-2}$, $RL_* = \dfrac{kgz_0 \, \Delta T_0}{\theta_0 \, u_*^2} < 10^2$; voir texte Taylor).

D. — *Discussion sur l'évolution longitudinale des flux de surface*

Dans le premier article de cette série consacrée à l'étude de l'advection (Itier et Perrier, 1976 I), nous avions été amenés à suggérer que l'évolution du flux advectif pourrait être assimilé à une fonction simple de la distance au bord, de la forme $\dfrac{\phi_{adv}}{ku_* \, \Delta C_0} = A(x/z_0)^B$. Il nous a semblé intéressant de comparer d'une part les résultats expérimentaux à un ajustement de ce type (cf. fig. 4*c* courbe en tirets) et d'autre part de comparer les divers résultats expérimentaux obtenus par divers chercheurs aux valeurs données par le modèle analytique pour diverses gammes de distance.

Cette comparaison est résumée sur le tableau 1 sur lequel nous avons également porté le paramètre $\mu_{opt} = \dfrac{x}{X}$ (cf. Itier et Perrier, 1976 II) permettant de déterminer la position x où une mesure locale de l'évapotranspiration permettrait d'estimer l'éva-

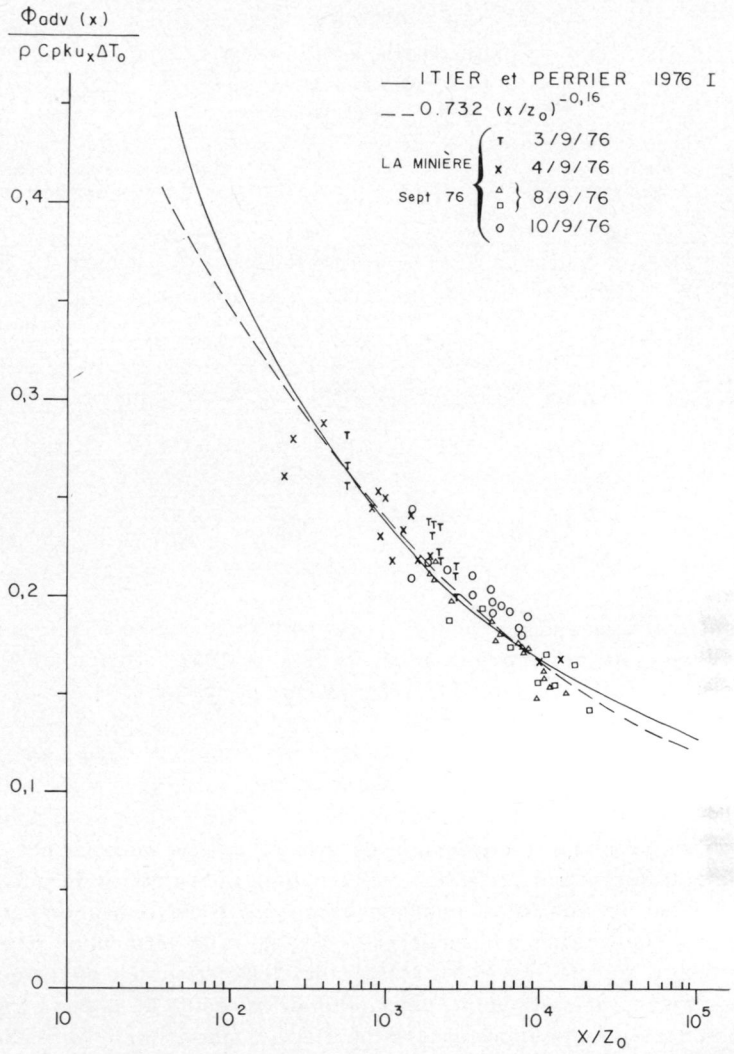


FIG. 4c. — *Résultats des mesures sur l'évolution du flux advectif de chaleur sensible. Measured heat advective flux.*

potranspiration moyenne sur un périmètre irrigué de longueur x dans le sens du vent, par vent de direction constante.

A l'exception de notre propre expérience décrite précédemment et utilisant la pesée de petites boîtes et compte tenu des problèmes de précision dont nous avons déjà parlé, on voit que l'ensemble des vérifications expérimentales permettent aisément l'ajustement à des lois du type $A(x/z_0)^B$ dont l'exposant B est très voisin de celui que fournit le modèle pour la plus grande gamme de variation des distances. Cet exposant B est très voisin de — 1/6 déjà suggéré par Philip (1959). Quant à la valeur de μ_{opt}, l'ensemble des vérifications montrent bien qu'en mesurant l'évapotranspiration d'un périmètre irrigué au 1/3 de sa distance totale sous le vent, on aura bien directement

TABLEAU 1

Approximation du flux advectif
$\phi_{adv} = (\rho C_p \, k u_* \, \Delta T_0) . A(x/z_0)^B$
Advectif flux approximation

	Modèle analytique Analytical model			Vérification expérimentale Experiment			
				Lang *et al.*	Morgan *et al.*	Itier *et coll.*	
x/z_0	$10\text{-}10^3$	$50\text{-}10^5$	$10^3\text{-}10^5$	Pesées Weighing	Profils H_2O Profiles	Pesées Weighing	Profils Température Profiles
A	0,887	0,748	0,665				0,732
B	— 0,19	— 0,159	— 0,15	— 0,170 ± 0,036	— 0,176 ± 0,009	— 0,08 ± 0,05	— 0,159 ± 0,014
μ_{opt}	0,33	0,336	0,339	0,335 ± 0,008	0,333 ± 0,002	0,35 ± 0,01	0,336 ± 0,003

l'évapotranspiration moyenne comme le prévoyait (même si ce n'était que de façon implicite) l'ensemble des modèles existants (Philip, 1959 ; Taylor, 1970 ; Perrier, 1974 ; Weisman, 1975 ; Seguin, 1975 ; Itier et Perrier, 1976 ...).

IV. — Conclusion

Malgré les problèmes de précision de mesure que ne manque pas de susciter le contrôle de différences assez faibles concernant des paramètres délicats à mesurer (écarts de température de l'air à un même niveau, écarts d'évaporation par différence sur des pesées elles-mêmes différentielles — cf. § 2), cette vérification expérimentale nous a conduits à accepter les résultats théoriques de notre modèle analytique d'advection locale comme une assez bonne description de la réalité du phénomène.

Un bon accord entre expérience et théorie se dégage, dans l'ensemble, de cette confrontation. Il reste que, pour expliquer les différences de comportement près du bord au vent constatées au cours du contrôle par pesées de l'évolution de l'évaporation, il conviendrait de tenir compte de l'influence de l'évolution de la structure thermique sur le profil de diffusivité, l'advection hydrique étant toujours liée à une advection thermique. Ce problème théorique pose pour l'instant un certain nombre de difficultés.

L'influence marquante de cet effet ne se faisant probablement sentir que très près du bord, il reste que, pour tout ce qui concerne les applications qui peuvent être faites pour les problèmes d'irrigation, on peut préconiser la formule approchée du type de celle dont les paramètres sont spécifiés au tableau 1 :

$$\phi_{adv} \sim 360 \; u_* \; \Delta T_0 \; \sqrt[6]{z_0/x}$$

La prise en compte de l'effet advectif conduit, pour des mesures effectuées au centre de périmètres irrigués, à des corrections dont l'ordre de grandeur peut aller

jusqu'à 1 à 2 mm d'eau par jour pour des écarts de température surfacique entre zone irriguée et zones environnantes de l'ordre de 5 à 10 °C (Itier, 1977).

Reçu pour publication en juillet 1978.

Summary

Analytical study of local advection

III. — *Experimental control of the model*

That paper follows two previous articles (Itier, Perrier, 1976 I, II) in which were presented an analytical model of local advection and some applications as the estimation of mean water consumption of irrigated plots. It presents here the experimental control of that model, performed on a wet bare soil surrounded by dry area near Versailles during the dry summer of 1976 (fig. 1 and 2). It was designed to measure the evolution with distance from the leading edge in the wind direction of three parameters : temperature profile, evaporation or latent heat flux and sensible heat flux. Temperature profiles were measured on five masts, one being on the dry zone. Evaporation was estimated by weighing little boxes filled of wet soil and let on the field during 30 mn to 1 hr. Sensible heat flux was obtained by using aerodynamic method (wind and temperature profiles).

Figure 3*a* gives the theoretical curves for temperature or concentration differences between the two zones and figure 3*b* shows the results obtained for $z = 100\ z_0$ compared to theoretical curves for 50, 100 and 200 z_0.

Figure 4*a* gives the theoretical decrease of advective flux as obtained by different workers.

Figure 4*b* shows the results obtained by weighing the little boxes. Although this kind of experiment be difficult to perform accurately, the magnitude of the advection flux appears close to the theoretical one but with a somewhat smaller decrease slope. That could be explained by the reduction of turbulence due to stability near the leading edge which is not taken into account in the model.

Figure 4*c* gives the results for the sensible advective flux decrease. In this case, there is a very good agreement between experiments and model. That agreement could be due to the higher accuracy in the measurements compared to previous case, but in an other hand there is some problem in that control because aerodynamic method is used while being one of the basic laws in the model itself.

Finally, we give in table 1 a comparison between the model and different estimations of advective fluxes, showing how the advective flux decrease with distance could be approximated by a power law whose exponant is close to — 0.15 and how the mean flux is obtained at 1/3 of the distance from the leading edge. We conclude by some comments on application to irrigation.

Zusammenfassung

Vorführung einer analytischen Untersuchung der Advektion

III. — *Experimentelle Nachprüfung des Modells*

Nach einer analytischen Untersuchung der durch Oberflächentemperatur- und feuchtigkeitsschwankungen bedingten Advektion (Itier und Perrier 1976 I) und nach der Analyse der Anwendungen dieser Untersuchung auf die Messung und Schätzung der Evapotranspiration (Itier und Perrier, 1976 II), führen wir hier die experimentelle Nachprüfung des auf bewässerten Kahlboden während der Dürre des 1976 Sommers zustandegebrachten Modells vor.

Diese Nachprüfung betrifft einerseits die Anderung der vertikalen Temperaturprofilen und anderseits die der Oberflächenströme ; sei es der aus lokalisiertem Abwiegen gemessene Wasserdampfstrom oder der wahrnehmbare Wärmestrom, der aus den Temperaturprofilen mit der Aerodynamik Methode erzielt ist.

Die gute Übereinstimmung zwischen Aussichten und Messungen ausser einigen in dem dritten Abschnitt III B erörteten Beschränkungen ermöglicht es, die vorher gegebenen Näherungsverhältnisse (Itier und Perrier II) auf die Führung der Bewässerung auf einen kleinen Umfang anzuwenden.

РЕЗЮМЕ

Аналитическое изучение адвекции.

III. — Экспериментальная проверка модели.

Б. ИТЬЕ, А. ПЕРРЬЕ, Г. ГОСС.

Принимая во внимание аналитическое изучение адвекции, вызванной изменениями температуры и влажности на поверхности (Итье и Перрье 1976 I), и анализ применения этого изучения при измерениях и оценке эвапотранспирации (Итье и Перрье 1976 II), в данной работе рассматривается экспериментальный контроль модели реализованной на голой, неорошаемой почве во время засушливого лета 1976-го года.

Контроль этот касается эволюции вертикальных профилей температуры и эволюции поверхностных потоков : потока водного пара, измеренного на базе локализированных взвешиваний, и потока чувствительного тепла, полученного аеродинамическим методом, на базе профилей температуры.

Хорошая согласованность, наблюдавшаяся за редкими исключениями, обсуждающимися в параграфе III B, между прогнозом и измерениями, позволяет применить относительные формулы, указанные в пред'идущей работе (Итье и Перрье II) при проведении орошений на площадях небольших размеров.

Références bibliographiques

BUSINGER J. A., WYNGAARD J. C., IZUMI Y., BRADLEY E. T., 1971 Flux profile relationship in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181-189.

ITIER B., PERRIER A., 1976. Présentation d'une étude analytique de l'advection. I. *Ann. agron.*, **27** (2), 111-140. II. — *Ann. agron.*, **27** (4), 417-433.

ITIER B., 1977. Détermination des corrections à apporter aux mesures et aux estimations de l'évapotranspiration en régime advectif. *La Météorologie*, VIe série, 11.

LANG A. R. F., EVANS G. N., HOP. Y., 1974. The influence of local advection on evapotranspiration from irrigated rice in a semi arid region. *Agric. Met.*, **13**, 5-13.

MORGAN D. L., PRUITT W. O., LOURENCE F. J., 1970. Evaporation from an irrigated turf under advection of dry air at Davis, Calif. *Tech. Rept. GRANT. DA-AMC*-28-043-68-610. *Univ. Calif., Davis*.

PERRIER A., 1974. Advection et Variations microclimatiques. 13e *J. Hydraulique*, Quest. III, Rap. 5, Paris Sept.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J. M., BLANCO de PABLOS A., 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. *Ann. agron.*, **26** (1), 19-40.

PHILIP J. R., 1959. The theory of local advection. I. *J. of Met.* **16** (5), 535-547.

SEGUIN B., 1975. Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale de l'évapotranspiration potentielle. *Agricult. Meteor.*, **15**, 355-370.

TAYLOR P. A., 1970. A model of airflow above changes in surface heat flux temperature and roughness for neutral and unstable conditions. *Boundary layer Meteor.*, I, 18-39.

WEISMAN R. N., 1975. A developing boundary layer over evaporating surface. *Boundary layer Meteor.*, **8**, 437-445.

Ann. agron., 1978, **29** (3), 223-242.

Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez le soja (cv Amsoy 71 et Hodgson)

R. BLANCHET et N. GELFI

avec la collaboration technique de J. Laurent
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Toulouse, I.N.R.A.
B.P. 12, 31320 *Castanet-Tolosan*

Résumé

Le soja (*Glycine max.* L. Merril) présente souvent un indice foliaire élevé. L'effet d'une réduction de la surface foliaire a été étudié en vases de végétation, sur deux variétés à croissance indéterminée (Amsoy 71, groupe II ; Hodgson, groupe I), au moyen de l'ablation d'une ou de deux folioles par feuille, à partir de l'apparition de la quatrième feuille trifoliée, pendant tout le reste du cycle végétatif. Les plantes étaient placées soit en conditions de transpiration maximale, soit à 75 p. 100 ou 55 p. 100 de celle-ci. Des contrôles d'ouverture des stomates et d'activité photosynthétique ont été réalisés par les techniques de Shimshi (1967, 1969) ; les expériences ont été conduites au cours de deux années climatiques très différentes, 1976 et 1977.

En l'absence de contrainte hydrique, la consommation d'eau et la production de matière sèche totale et de grains sont sensiblement proportionnelles aux quantités de feuilles jusqu'à un indice foliaire voisin de 5 ; au-delà, un palier apparaît pour le grain, puis pour la consommation d'eau (fig. 2) ; la production de matière sèche totale continue à croître, de façon moins que proportionnelle.

En présence de contrainte hydrique, la surface foliaire est réduite, ainsi que la transpiration par unité de poids de feuilles (fig. 3) et la production de graines (fig. 5). L'activité photosynthétique, le rapport grain/matière sèche totale et l'efficience de l'eau consommée sont plus élevés aux faibles indices foliaires (fig. 6, 7 et 8).

La stimulation de l'activité des surfaces foliaires réduites est attribuable à l'effet d'appel de métabolites, déjà mis en évidence sur le soja par Thorne et Koller (1974). La réduction de l'alimentation hydrique affecte la transpiration avant la photosynthèse, et l'efficience de l'eau consommée est augmentée.

Le soja est donc une espèce très plastique, capable de s'accommoder de structures différentes. Par l'amélioration génétique et la maîtrise agronomique (irrigation notamment), il apparaît souhaitable d'obtenir chez ces types indéterminés des indices foliaires de 4 à 6, selon les disponibilités hydriques.

Introduction

Lorsqu'il est cultivé en conditions favorables, le soja présente souvent sous nos climats un indice foliaire élevé, pouvant dépasser 10 $\left(\text{rapport } \frac{\text{surface des feuilles}}{\text{surface de sol}}\right)$, et coïncidant avec une transpiration particulièrement importante (Station d'Agronomie de Toulouse, 1974 ; Puech *et al.*, 1974). Divers travaux (Teigen et Vorst, 1975 ; Egli et

Leggett, 1976) permettent cependant de penser qu'une telle abondance de feuillage n'est pas forcément indispensable à la production : la réduction des organes végétatifs peut en effet s'accompagner d'un accroissement de leur activité assimilatrice (Blanchet *et al.*, 1977).

L'ampleur de l'appareil foliaire dépend à la fois du génotype (caractères morphologiques, durées respectives des phases végétative et reproductrice) et du milieu, notamment de l'alimentation hydrique (Blanchet *et al.*, 1977). Comme chez d'autres espèces, une contrainte hydrique progressive limite en effet d'abord la croissance des feuilles, puis la photosynthèse nette (Hsiao et Acevedo, 1974). Ce fait paraît particulièrement net chez le soja (Boyer, 1970*a* ; Mederski *et al.*, 1973) : une réduction marquée de la photosynthèse se manifeste à des tensions de l'eau dans les feuilles nettement plus fortes que chez le maïs (Boyer, 1970*b*), alors que la croissance foliaire subit un handicap voisin de celui des autres cultures. Le rapport $\frac{\text{photosynthèse nette,}}{\text{transpiration}}$ c'est-à-dire l'efficience de l'eau consommée, peut toutefois se trouver accru dans ces conditions de sécheresse modérée (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976) ; la production de graines est souvent plus altérée (Mingeau, 1974 ; Puech *et al.*, 1977).

Au moyen d'ablations partielles de feuilles permettant d'obtenir en conditions de transpiration maximale des indices foliaires comparables à ceux de plantes de mêmes cultivars placées en milieux plus secs, nous avons tenté d'explorer cette influence de la surface foliaire sur la consommation d'eau et la production de matière sèche totale et de graines. Ces traitements, joints à des ablations de gousses, nous ont également donné quelques indications sur la variabilité du fonctionnement des feuilles selon l'abondance relative des organes végétatifs et reproducteurs d'une part, et les conditions d'alimentation hydrique d'autre part. Nous tenterons donc de préciser ici, dans le cas de sojas à croissance « indéterminée » (c'est-à-dire produisant simultanément des organes végétatifs et reproducteurs), l'influence de l'ampleur du développement foliaire sur la consommation d'eau et la production de matière sèche totale et de graines, en conditions d'alimentation hydrique limitée ou non. Des mesures plus ponctuelles de comportements stomatiques et d'échanges gazeux nous permettront de circonscrire les processus mis en jeu dans ces conditions expérimentales.

Méthodes expérimentales

L'étude a été réalisée en vases de végétation portant quatre plantes chacun, en ambiance naturelle (abri grillagé), et de manière à constituer un peuplement de treize plants par mètre carré. Une expérience principale a été conduite en 1976, et quelques traitements ont été repris en 1977, dans des conditions climatiques assez différentes (tabl. 1).

A. — *Expérience* 1976 (semis le 4 mai 1976)

Variétés.

Les variétés utilisées ont été Hodgson (groupe I, cycle végétatif environ 135 j) et Amsoy 71 (groupe II, cycle environ 150 j). Ces deux variétés sont assez voisines

TABLEAU 1

Principaux caractères climatiques de la période de végétation, en 1976 et 1977
Main characteristics of the climate during the pland growth in 1976 and 1977

Moyennes mensuelles	Températures, °C		Insolation, heures		ETP fétuque Manade, mm (champ voisin)	
	1976	1977	1976	1977	1976	1977
Mai	14,7	13,3	250	155	125	70
Juin	21,0	16,9	350	200	185	132
Juillet	21,3	18,9	300	205	198	141
Août	20,4	18,6	250	245	158	125
Septembre	16,4	16,3	200	250	100	98
Octobre	13,1	16,0	145	155	65	75

quant à leur origine géographique (nord des U. S. A.), leur aspect, leurs comportements généraux et leur productivité (Blanchet *et al.*, 1977). Cependant, Hodgson, plus précoce, produit généralement moins de feuilles qu'Amsoy 71, dont la phase reproductrice un peu plus tardive favorise sous notre climat l'exubérance végétative.

Traitements.

A partir de l'apparition de la quatrième feuille trifoliée, des ablations de folioles ont été pratiquées sur certains pots de manière à laisser subsister :

— soit les 3 folioles de chaque feuille (témoins sans ablations) ;
— soit 2 folioles par feuille (ablation d'une foliole latérale dès l'apparition) ;
— soit 1 foliole seulement (ablation des 2 folioles latérales dès leur apparition).

Les alimentations hydriques ont été différenciées en même temps, de manière à réaliser les combinaisons indiquées par le tableau 2. A cet effet, un pot de chacun des

TABLEAU 2

Traitements hydriques et ablations foliaires réalisés sur les variétés Hodgson et Amsoy 71 en 1976
Water treatments and leaves ablations applied to the varieties Hodgson and Amsoy 71 in 1976

Traitement hydrique	Transpiration maximale TM de chaque variété	75 p. 100 TM de la variété non mutilée	55 p. 100 TM de la variété non mutilée
Appareil foliaire...	3 folioles par feuille	3 folioles par feuille	3 folioles par feuille
	2 — —		2 — —
	1 — —		

traitements témoins (Hodgson 3 folioles et Amsoy 3 folioles à leurs transpirations maximales TM) était placé sur une balance et, lorsque la transpiration atteignait 300 g d'eau, un dispositif de pompes et de minuterie distribuait simultanément soit

75 p. 100, soit 55 p. 100 de cette quantité d'eau aux traitements à alimentation hydrique limitée.

Tous les pots conduits en régime de transpiration maximale TM étaient placés dans des cuvettes formant réservoir, et recevaient de l'eau à volonté de manière à maintenir le niveau hydrique à 2 cm environ du fond du pot. L'évaporation à partir de la cuvette était empêchée par une plaque de polystyrène. Les apports d'eau étaient notés, et la pesée permettait de contrôler éventuellement la transpiration horaire (cf. ci-dessous : contrôles d'échanges gazeux).

Dans tous les cas, l'évaporation à partir du sol était empêchée par un revêtement en matière plastique. La nutrition minérale était largement assurée, notamment par des apports réguliers d'azote minéral.

Outre les ablations foliaires, nous avons également pratiqué sur certains pots conduits en TM soit l'ablation de toutes les gousses au fur et à mesure de leur apparition, soit l'ablation des gousses des ramifications (50 p. 100 environ du total), de manière à réaliser divers rapports gousses/feuilles.

Contrôles.

Les données globales correspondant à l'ensemble du cycle végétatif ont été recueillies : consommations d'eau, productions de matière sèche totale, de gousses, de graines. En fin de végétation, les feuilles sèches ont été soigneusement recueillies et pesées après dessiccation complète à l'étuve.

Lorsque la plupart des gousses ont été formées, nous avons mesuré sur certains traitements la surface foliaire, et examiné à diverses reprises la transpiration, l'activité photosynthétique et l'ouverture des stomates, à l'aide de méthodes précédemment décrites (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976). Elles sont brièvement les suivantes :

— Contrôle de la transpiration par pesée des pots à intervalles réguliers.

— Mesure de l'activité photosynthétique par la technique de Shimshi (1969), qui consiste à faire passer pendant 20 s, sur une partie éclairée d'une feuille adulte, une quantité connue d'air normal contenant une très petite dose également connue de gaz carbonique radioactif (1,6 μCi). L'échantillon traité est aussitôt prélevé à l'emporte-pièce et, après réfrigération et dessiccation rapides, le carbone radioactif fixé est dosé au compteur Geiger.

— Le degré d'ouverture des stomates est apprécié par un poromètre analogue à celui de Shimshi (1967), avec lequel on mesure le temps nécessaire pour que la pression appliquée sur la face supérieure de la feuille diminue de moitié (200 à 100 g/cm^2). Cette durée est exprimée en secondes ; elle varie de 1 à 2 s (stomates bien ouverts) à plus de 1 mn (stomates fermés). Elle constitue un indice relatif variant dans le même sens que l'état d'ouverture des stomates et, de même que pour l'appréciation de l'activité photosynthétique, il s'agit de tests agronomiques plutôt que de mesures physiologiques précises. Néanmoins, chez le soja, ces tests rendent bien compte du comportement de la plante (Gelfi, 1975).

B. — *Expérience* 1977 (semis le 13 mai 1977)

Au cours de celle-ci, nous avons repris en conditions TM sur Amsoy 71 les traitements comportant 3, 2 ou 1 foliole par feuille. Les modalités de conduite et de contrôle ont été identiques.

Résultats

Signalons tout d'abord que les ablations réalisées n'ont pas entraîné de traumatismes importants pour les plantes : la réduction du nombre de folioles a fortement diminué le feuillage, quoiqu'une croissance un peu supérieure des folioles restantes soit intervenue. La hauteur des plantes et la production de matière sèche totale ont été plus affectées que la fructification (tabl. 3).

TABLEAU 3

Résultats obtenus en 1976 *et* 1977 *sur la variété Amsoy* 71 *comportant* 1, 2 *ou* 3 *folioles par feuille, en conditions TM* (résultats exprimés par pot de quatre plants)

Datas obtained in 1976 *and* 1977 *for the variety Amsoy* 71 *having* 1, 2 *or* 3 *leaflets by leave in MT conditions* (datas expressed per pot *of* four plants)

Nombre de folioles par feuille	1976			1977		
	3	2	1	3	2	1
Indice foliaire en fin de formation des gousses	8,3	6,5	4,2	8	6	5
Poids de feuilles sèches à maturité, g	137	99	91	110	68	48
Hauteur, cm	218	172	165	143	137	126
Eau consommée, l	167	157	146	121	127	104
Matière sèche totale, g	427	365	352	367	350	280
Poids de grains, g	147	142	139	139	140	122
Nombre de gousses	300	304	296	272	296	276
Nombre de grains	776	812	768	704	822	716
Poids de 1 000 grains, g	187	175	181	198	195	188
Rapports $\frac{\text{grains}}{\text{organes végétatifs}}$	0,51	0,64	0,65	0,61	0,67	0,77
Efficience eau, g M. S. par litre d'eau :						
— M. S. T.	2,56	2,34	2,41	3,03	2,75	2,69
— grains	0,87	0,91	0,95	1,15	1,10	1,17

Pour analyser ces résultats, nous prendrons surtout pour base de comparaison les quantités de feuilles sèches recueillies à maturité. En effet, ce caractère intègre bien sur l'ensemble du cycle végétatif l'abondance foliaire, qui n'est pas très facile à comparer en cours de végétation chez ces plantes à croissance indéterminée, en raison d'une part des rattrapages intervenus assez lentement (croissance plus grande des folioles restantes), d'autre part des rythmes de croissance différents liés aux conditions climatiques. Ainsi, le printemps chaud de 1976 a provoqué un développement foliaire beaucoup plus rapide et abondant que les conditions fraîches ayant régné à la même époque en 1977. C'est pourquoi nous avons choisi comme principal terme de référence l'état final représenté par le poids de feuilles sèches à maturité, que nous utiliserons souvent comme variable en abscisse dans les représentations graphiques. Ces poids de feuilles sont inclus dans ceux de matière sèche totale, dans laquelle ils représentent environ 25-30 p. 100. Constituant l'essentiel des organes transpirants et assimilateurs, nous les considérerons surtout sous cet angle, en examinant les répercussions de leur abondance sur la production de matière sèche totale ou de grain, et sur la consommation d'eau.

A. — *Influence de l'abondance foliaire sur la production et la consommation d'eau, en l'absence de contrainte hydrique, chez la variété Amsoy 71*

Pour donner une première vue d'ensemble des comportements, la figure 1 indique les productions et les consommations totales d'eau observées en 1976 et 1977 sur les traitements effeuillés ou non de la variété Amsoy 71 conduite en TM. On

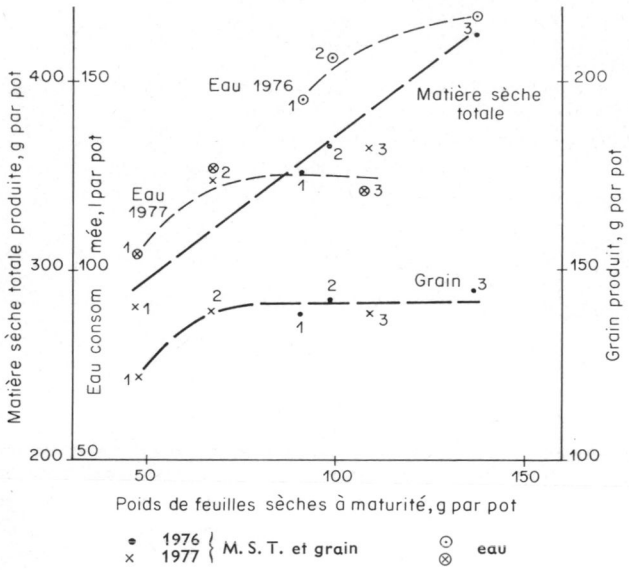


FIG. 1. — *Production de matière sèche totale et de grain et consommation d'eau, en fonction du poids de feuilles. Variété Amsoy 71, condition TM, 1976 et 1977 ; 1, 2, 3 : nombre de folioles par feuille.*

Relationship between total dry matter and seed production, water consumption and weight of leaves. Var. Amsoy 71, maximum transpiration conditions MT 1976 and 1977 ; 1, 2, 3 : leaflets number by leave.

constate que la production de matière sèche totale est, dans cet intervalle de variation et sur les deux années, une fonction croissante de la quantité de feuilles. Il n'en va pas de même pour la production de grains : celle-ci plafonne vers une valeur qui correspond à un indice foliaire de l'ordre de 5 atteint vers la fin de la formation des gousses. Le rapport $\frac{\text{organes végétatifs}}{\text{grains}}$ se trouve accru par la réduction du feuillage (tabl. 3), la fructification étant peu affectée.

Il faut néanmoins remarquer que si le moindre développement végétatif évite d'accumuler inutilement des assimilats dans les tiges et feuilles, il n'accroît pas pour autant la production de gousses et de graines : celle-ci diminue au contraire en 1977 pour l'effeuillage le plus sévère. Tout se passe donc chez cette variété comme si la production de feuilles et de tiges était pléthorique en bonnes conditions, sans pouvoir être remplacée par des gousses et graines quoique la floraison soit largement surabondante (Puech *et al.*, 1976, 1977). La fructification semble donc exiger un minimum de surface foliaire, minimum au-delà duquel apparaît une sorte « d'indifférence », chez cette variété.

Remarquons aussi (fig. 1 et tabl. 3) que les quantités d'eau consommées diminuent assez modérément avec l'effeuillage, l'indice foliaire restant suffisant pour capter l'énergie rayonnante. L'efficience de l'eau, plus élevée en 1977 en raison d'une évapotranspiration moindre (tabl. 1), ne présente pas de variations importantes et systématiques selon les traitements au cours d'une même année ; les différences 1976-1977 d'énergie rayonnante se sont davantage répercutées sur la consommation d'eau que sur la production.

B. — *Développement foliaire, transpiration et production sous divers régimes d'alimentation hydrique*

Nous considérerons surtout ici les résultats de l'expérience 1976, avec les deux variétés Hodgson et Amsoy 71. Comme nous l'avons signalé ci-dessus, Hodgson, à cycle un peu plus court, présente généralement un développement végétatif moindre ; il s'avère qu'en représentant graphiquement divers caractères en fonction des poids de feuilles sèches recueillies à maturité sur les deux variétés, on obtient généralement une bonne continuité de ces représentations, que les valeurs proviennent de Hodgson ou de Amsoy 71 (fig. 2 à 7). Si cette coïncidence peut être en partie fortuite, et par conséquent à considérer avec prudence, elle reflète néanmoins une forte analogie de

TABLEAU 4

Résultats obtenus dans les divers traitements appliqués en 1976 *à la variété Hodgson soumise à diverses ablations foliaires et contraintes hydriques* (exprimés par pot de quatre plants)

Datas obtained from different treatments applied in 1976 *to the variety Hodgson, referring to different leaves ablations and water stresses* (expressed per pot of four plants)

Traitements : Feuilles	3 folioles			2 folioles		1 foliole
Régime hydrique	TM	75 p. 100 TM	55 p. 100 TM	TM propre	55 p. 100 TM	TM propre
Hauteur des plantes, cm	173	151	118	161	116	142
Matière sèche totale, g	330	269	248	306	228	263
Organes végétatifs, g	196	165	146	178	136	149
Feuilles à maturité, g	90	74	69	81	62	69
Nombre de gousses	316	252	260	316	228	312
Nombre de graines	744	604	612	736	508	724
Nombre de graines par gousse	2,4	2,4	2,4	2,3	2,2	2,3
Poids de 1 000 graines, g	180	172	167	174	182	157
Poids total de graines, g	134	104	102	128	92	114
Rapports $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$	0,68	0,63	0,70	0,72	0,68	0,765
Eau consommée pendant le cycle végétatif, l	140	106	85	135	86	123
Efficience eau sur production :						
• de MST $\left(\frac{\text{MST}}{\text{eau consommée}}\right)$	2,36	2,54	2,92	2,27	2,65	2,14
• de graines $\left(\frac{\text{graines}}{\text{eau consommée}}\right)$	0,96	0,98	1,20	0,95	1,07	0,93
Rapports $\frac{\text{eau transpirée, l}}{\text{poids feuilles sèches, g}}$	1,55	1,44	1,24	1,57	1,39	1,68

fonctionnement due à une ascendance génétique assez proche. Cette continuité permet d'explorer un large champ de variation, correspondant à des indices foliaires de 4 à plus de 8 à l'époque de la formation des gousses (tabl. 3 et 4).

La figure 2, sur laquelle sont représentées les consommations d'eau et les productions de matière sèche totale et de grains de 1976 en fonction du développement foliaire, permet précisément de situer les résultats dans un large éventail de variation : on constate que les valeurs obtenues en régime TM sont sensiblement proportionnelles aux développements foliaires jusqu'à un indice de l'ordre de 5 (mesuré à l'époque de

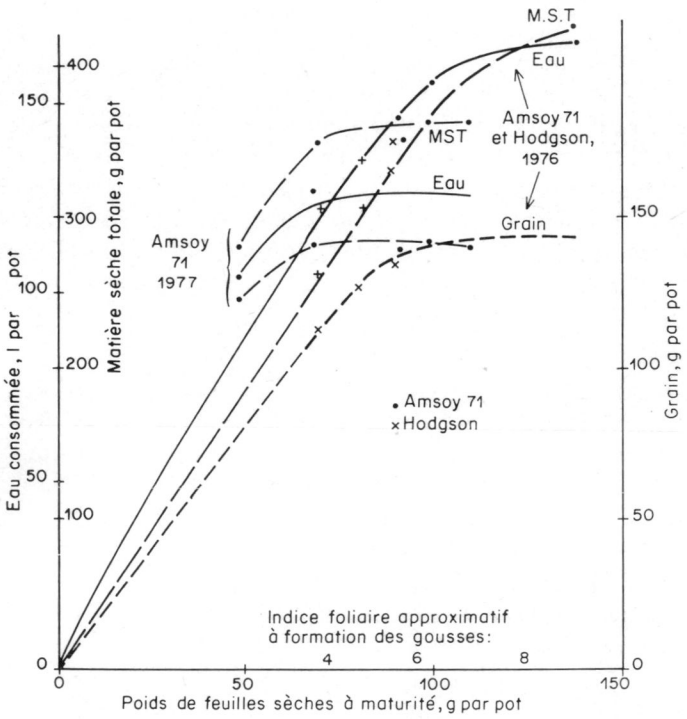


FIG. 2. — *Consommations d'eau, productions de matière sèche totale et de grain en fonction des poids de feuilles sèches à maturité. Variété Amsoy 71 et Hodgson, 1976 ; Amsoy 71, 1977 ; conditions TM.*

Water consumption and total dry matter and grain yield in relation to weight of dry leaves at harvest. Var. Amsoy 71 and Hodgson 1976 ; Amsoy 71, 1977 ; max. transp. conditions.

la formation des gousses). Au-delà, un palier se dessine nettement pour le grain, puis pour la consommation d'eau. La production de matière sèche totale, par contre, semble continuer à croître, quoique de façon moins que proportionnelle à la quantité de feuilles.

En 1977, en conditions d'éclairement plus faible, les courbes présentent une allure assez comparable, avec un indice foliaire critique plus faible également, voisin de 4.

A partir de ces comportements généraux, et pour dégager l'influence des contraintes hydriques, il importe maintenant de considérer plus en détail les faits intervenus dans le domaine agronomique de variation, qui correspond aux divers traitements que nous avons réalisés (production de grains correspondant à environ

20 à 45 q/ha). Si l'on compare pour cela les figures 3, 4 et 5, les constatations suivantes se dégagent :

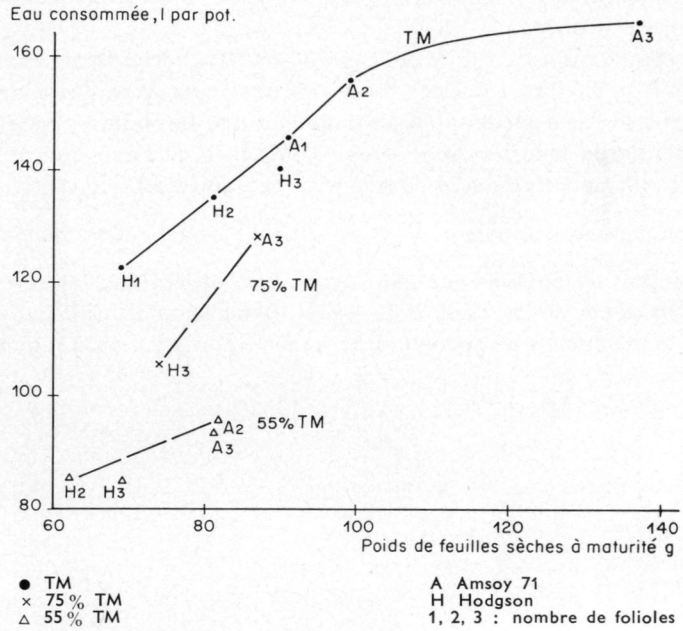


FIG. 3. — *Consommations d'eau en fonction des poids de feuilles : influence des contraintes hydriques ; 1, 2, 3 : nombre de folioles par feuille.*

Relationship between water consumption and weight of leaves ; influence of the water stress ; 1, 2, 3 : number of leaflets by leave.

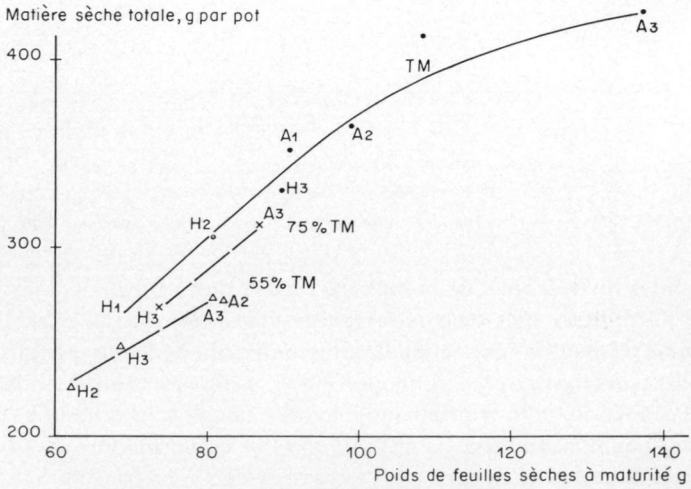


FIG. 4. — *Production de matière sèche totale en fonction des poids de feuilles dans les divers régimes hydriques.*

Relationship between total dry matter production and weight of leaves in the various water regimes.

— La restriction de l'alimentation hydrique conduit à des transpirations par unité de poids de feuilles d'autant plus faibles que la contrainte est plus sévère (fig. 3) ; celle-ci réduit à la fois la surface foliaire (tabl. 4) et, pour une même quantité de feuilles, leur transpiration propre.

— Les répercussions sur la production de matière sèche totale sont moindres : la figure 4 fait apparaître entre les divers régimes hydriques des écarts nettement plus faibles que les transpirations. Cela implique que la photosynthèse nette ait été moins réduite que la transpiration, et que l'efficience de l'eau ait augmenté. C'est bien ce que confirme le tableau 4 ; l'efficience de l'eau s'est accrue en milieux secs, par le jeu d'un meilleur rapport $\frac{\text{photosynthèse nette}}{\text{transpiration}}$, indépendamment de la quantité absolue de feuilles. Rappelons que nous avons déjà observé à plusieurs reprises ces comportements (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976 ; Blanchet *et al.*, 1977).

— Pour la production de grains (fig. 5), les différences dues aux régimes hydriques

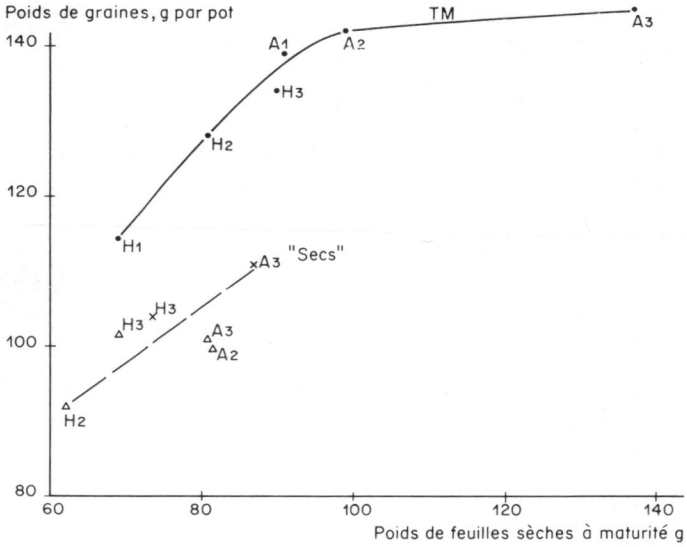


FIG. 5. — *Production de graines en fonction des poids de feuilles, avec ou sans contrainte hydrique.*

Relationship between grain production and weight of leaves with or without water stress.

sont plus grandes qu'à l'égard de la matière sèche totale, et reflètent les difficultés de fructification en milieux secs déjà mises en évidence (Mingeau, 1974 ; Puech *et al.*, 1977). Pour une même quantité de feuilles, la contrainte hydrique pénalise davantage la production de graines que l'assimilation nette totale (comparaison des fig. 4 et 5), mais la forte réduction de la transpiration conduit néanmoins à une augmentation de l'efficience de l'eau consommée. La figure 6 montre qu'en milieux secs l'avantage de faibles surfaces foliaires à l'égard de l'efficience de l'eau consommée est très net, alors qu'en régime TM un indice foliaire modéré semble présenter un léger optimum.

Notons que dans ces conditions expérimentales la sécheresse s'exerçait de façon à peu près uniforme sur l'ensemble du cycle végétatif, et que les surfaces foliaires

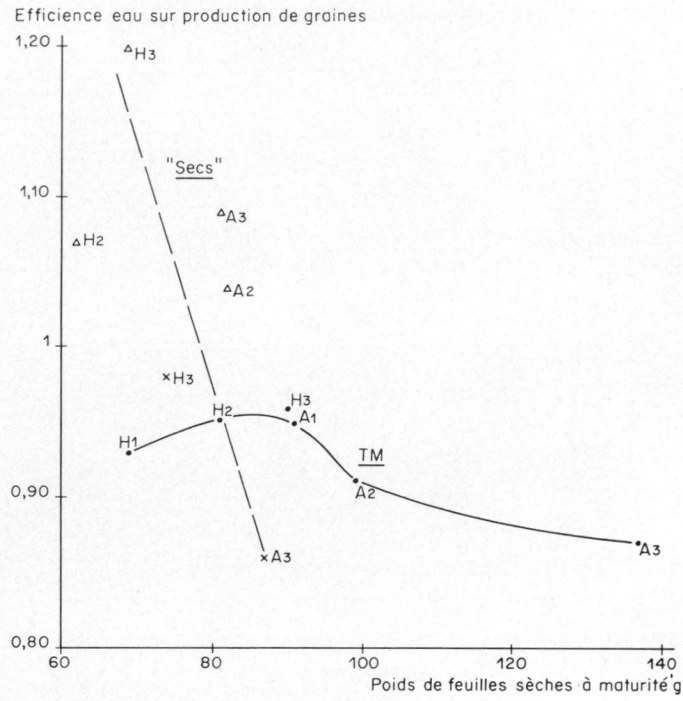


FIG. 6. — *Efficience de l'eau pour la production de graines, en fonction des poids de feuilles. Relationship between water efficiency for the production of seed and weight of leaves.*

tendaient à s'ajuster d'elles-mêmes aux ressources en eau. Nous ne traitons pas ici l'influence du mode et de l'époque d'intervention de la contrainte hydrique, qui ont déjà été évoqués par ailleurs (Station d'Agronomie de Toulouse, 1974, 1978) ; rappelons seulement qu'une sécheresse intervenant tardivement sur un appareil végétatif très développé peut avoir des conséquences très néfastes sur la production de grains. Aussi, compte tenu de l'ensemble des résultats ci-dessus, on peut considérer qu'un indice foliaire de l'ordre de 4 apparaît convenir à des conditions culturales dans lesquelles la sécheresse estivale a de fortes chances d'intervenir. Ces surfaces foliaires modérées sont suffisantes pour assurer l'assimilation et la fructification compatibles avec les disponibilités hydriques, comme nous l'avons déjà constaté en comparant un ensemble de variétés (Blanchet *et al.*, 1977).

La fructification étant plus handicapée par le déficit hydrique que l'assimilation nette, il suffit d'autre part d'une quantité limitée de feuilles pour obtenir un rapport $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$ équivalent à celui d'un milieu humide ; la figure 7 indique à la fois les relations assez étroites existant entre ces rapports et l'abondance foliaire, et le décalage qui intervient sous l'influence de la contrainte hydrique. On peut en résumer ainsi les effets :

— Pour une même quantité de feuilles, le rapport $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$ est plus

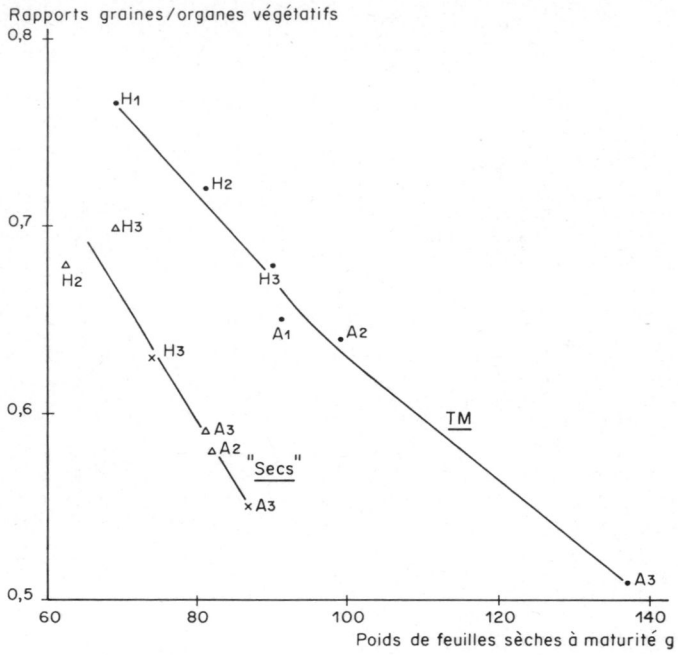


FIG. 7. — *Rapports* $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$ *en fonction des poids de feuilles.*

Relation between the ratio $\frac{\text{seed}}{\text{vegetative organ}}$ *and the weight of the leaves.*

faible en milieu sec (difficultés de fructification et de transferts d'assimilats vers les graines ; Mederski, 1973).

— Un même rapport $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$, que l'on souhaite généralement aussi élevé que possible dans une culture destinée à la production de graines, est obtenu avec une quantité de feuilles moindre en condition sèche (même cause de handicap de fructification).

Si l'on tente de synthétiser ces enseignements, c'est donc un développement foliaire modéré et une excellente aptitude à la fructification qu'il convient particulièrement de rechercher en milieu sec, de manière à obtenir une production de graines aussi abondante que possible, une efficience de l'eau élevée, et un haut rapport $\frac{\text{graines}}{\text{organes végétatifs}}$. L'action de l'amélioration variétale peut apparemment s'exercer en ce sens pour l'adaptation aux conditions sèches.

En milieu humide, c'est naturellement la production maximale de graines qu'il faut viser, et les besoins en feuillage peuvent différer selon les variétés. Ainsi, Hodgson a manifesté un net fléchissement du poids moyen des grains dans le cas d'effeuillage le plus sévère (tabl. 4), ce qui n'est pas apparu chez Amsoy 71. Les feuilles jouent en effet un rôle de réserve temporaire d'assimilats (Puech *et al.*, 1974) et, selon les comportements variétaux, leur insuffisance peut ou non nuire au bon remplissage des grains.

Discussion et conclusions

Deux faits principaux se dégagent de ces résultats :

— En l'absence de contrainte hydrique, ces types de soja à croissance indéterminée peuvent assurer une bonne production de graines avec un feuillage plus réduit que celui qu'ils développent lorsqu'ils se trouvent dans des conditions favorables. Cela implique que ce feuillage réduit photosynthétise plus activement d'une part parce qu'il est mieux éclairé, d'autre part parce que les échanges gazeux sont plus stimulés.

— En présence de contrainte hydrique, la production est abaissée, et la fructification est handicapée (formation des gousses notamment). Cependant, l'efficience de l'eau consommée, c'est-à-dire sensiblement le rapport $\frac{\text{photosynthèse nette}}{\text{transpiration}}$, s'accroît quelque peu, sans que le meilleur éclairement du feuillage en soit responsable (tabl. 4). La photosynthèse nette a donc été moins réduite que la transpiration.

Nous tenterons ici d'éclairer un peu ces deux points, en faisant appel aux mesures d'échanges gazeux réalisées.

A. — *Abondance foliaire et échanges gazeux*

La figure 8 indique les comportements observés au cours d'une belle journée (5 août 1976), à l'époque de la fin de la formation des gousses, sur des plantes de la variété Amsoy 71 ayant subi diverses ablations de folioles ou de gousses ; pour les mesures, ces plantes étaient placées en dehors de leur couvert, de manière que toutes

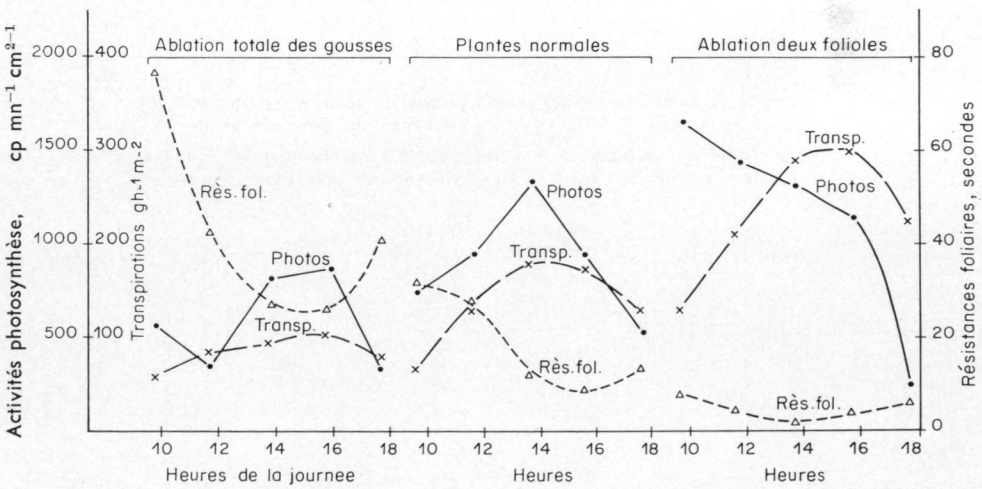


FIG. 8. — *Comparaison de l'ouverture des stomates et des échanges gazeux chez les plantes normales et chez celles qui ont subi l'ablation totale des gousses, ou l'ablation de deux folioles* (5-08-1976, *conditions TM*).

Comparison between stomatal aperture and gas exchanges for the standard plants and plants which were undergone total ablation of pods or ablation of two leaflets.

les feuilles supportant les mesures soient bien éclairées, et que la lumière ne constitue pas un facteur limitant variable selon l'indice foliaire. On observe les faits suivants :

— Dans le cas d'ablation des gousses, les stomates s'ouvrent peu, les feuilles éclairées étant sans doute encombrées d'assimilats ; la photosynthèse et la transpiration par unité de surface foliaire sont faibles.

— Les plantes normales présentent un comportement classique (Gelfi, 1975) : au cours de la matinée, les stomates s'ouvrent et les échanges gazeux s'accroissent, puis diminuent en fin d'après-midi.

— Chez les plantes effeuillées, les stomates sont très ouverts dès le matin et, quoique la température soit encore relativement fraîche (22 °C), l'activité photosynthétique est intense ; la transpiration suit une variation journalière comparable à celle des sujets normaux, avec une intensité plus grande. Ces plantes présentent donc une forte stimulation de leurs échanges gazeux.

Ainsi, l'ouverture des stomates, l'activité photosynthétique et la transpiration peuvent varier considérablement dans de mêmes conditions d'environnement et d'alimentation hydrique ; elles dépendent très largement de l'appel de métabolites qu'exercent les gousses (« effet de puits »). La réduction de la surface foliaire est alors compensée par un fonctionnement beaucoup plus actif (Thorne et Koller, 1974), qui peut intervenir même lorsque la température n'est pas très favorable à la photosynthèse (optimum 27-30 °C chez le soja).

Le tableau 5 montre que les productions de matière sèche totale et les consommations d'eau ont été assez peu affectées par les divers traitements, en raison des compensations intervenues. En l'absence des gousses, les assimilats sont restés accumulés dans les feuilles qui ont manifesté une activité plus prolongée en fin de végétation (arrêt seulement aux premiers gels). Comme nous l'avons déjà montré ci-dessus, le soja apparaît donc comme une plante particulièrement « plastique ».

TABLEAU 5

Principaux caractères des plantes ayant subi diverses ablations en condition TM
(variété Amsoy 71, 1976, résultats exprimés par pot de 4 plants)

Main characteristics of plants undergone the various treatments in MT conditions
(variety Amsoy 71, 1976 — data expressed per pot of four plants)

Traitement	Ablation toutes gousses	Ablation 50 p. 100 gousses	Plantes normales	Ablation 1 foliole	Ablation 2 folioles
Fin formation des gousses (5-8-76) :					
Surface foliaire, m^2	3,14	3,15	2,56	2,00	1,31
Indice foliaire	10,3	10,3	8,3	6,5	4,2
Transpiration journalière, l	3,80	4,56	4,56	4,28	4,24
Maturité :					
Poids de matière sèche totale, g ...	394	395	427	365	352
Poids de feuilles sèches, g.	248	148	137	99	91
Poids de grains, g	0	94	145	142	139
Eau consommée totale, l	179	176	167	157	146
Efficience eau : $\frac{\text{MST}}{\text{eau consommée}}$ ..	2,18	2,24	2,56	2,34	2,41

B. — *Modification des échanges gazeux sous l'effet d'une restriction de l'alimentation hydrique* (*fig.* 9 *et* 10)

Dans cette expérience, les cultures de soja (variété Amsoy 71) étaient réalisées dans les mêmes conditions de culture et d'environnement que les précédentes. Toutefois, les pots soumis pendant tout le cycle végétatif aux contraintes hydriques ne recevaient pas au cours de la journée des quantités d'eau comblant périodiquement leurs déperditions, mais un seul arrosage était réalisé le matin, en apportant soit 60 p. 100, soit 40 p. 100 de la transpiration réalisée la veille par le traitement TM. Ces pots se trouvaient donc le matin assez bien alimentés en eau, et subissaient au cours de la journée une dessiccation progressive. Ces conditions sont un peu différentes de celles de l'expérience principale, et sans doute un peu plus éloignées de celles que l'on rencontre au champ, quoique la redistribution de l'eau qui s'effectue la nuit dans le sol, et qui aboutit à une meilleure hydratation de la plante le matin, apporte malgré tout une certaine similitude. Bien entendu, ces résultats obtenus sont rapportés ici à titre explicatif, sans préjuger de leurs possibilités exactes d'extrapolation. Les méthodes de contrôle de l'ouverture des stomates, de la transpiration et de l'activité photosynthétique sont celles qui ont été décrites ci-dessus, et les résultats ont déjà été publiés en détail par ailleurs (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976). Nous rappellerons seulement ceux qui permettent de mieux cerner l'influence de l'alimentation hydrique sur les rapports $\frac{\text{photosynthèse}}{\text{transpiration}}$, en considérant pour cela les comportements observés au cours d'une journée ensoleillée et chaude (29-7-1974).

En fonction des heures de cette journée, la figure 9 indique les résistances foliaires, activités photosynthétiques et transpirations des traitements extrêmes, TM et 40 p. 100 TM. Les stomates sont bien ouverts dès le matin dans les deux cas, mais se ferment progressivement dès le début de l'après-midi sous l'effet de la dessiccation en 40 p. 100 TM. Il en résulte naturellement une forte diminution de l'activité photosynthétique, mais celle-ci a été pendant toute la matinée aussi élevée qu'en TM, malgré une transpiration nettement moindre.

La figure 10 représente les rapports $\frac{\text{photosynthèse}}{\text{transpiration}}$ observés au cours de cette journée dans les trois traitements ; il s'en dégage deux constatations essentielles :

— Ces rapports sont les plus élevés le matin, surtout dans les traitements secs ; en dehors de l'effet de l'arrosage, nous retrouvons chez ces plantes à développement foliaire limité un caractère comparable à celui des sojas que nous avons volontairement effeuillés et laissés en régime TM (fig. 8) : photosynthèse active dès le matin, sous l'effet probable d'un appel de métabolites (effet de puits), alors que la transpiration est encore peu importante.

— Au cours de l'après-midi, ces rapports décroissent avec la réduction de l'activité photosynthétique dans les milieux secs, mais sur l'ensemble de la journée ils sont plus favorables qu'en TM. Ces journées ensoleillées et chaudes conduisent d'ailleurs à de très fortes transpirations, notamment l'après-midi lorsque l'eau n'est pas limitée ; la photosynthèse plafonnant vers 28-30°, le rapport $\frac{\text{photosynthèse}}{\text{transpiration}}$ est faible pendant les heures très chaudes (Gelfi, 1975 ; Gelfi *et al.*, 1976).

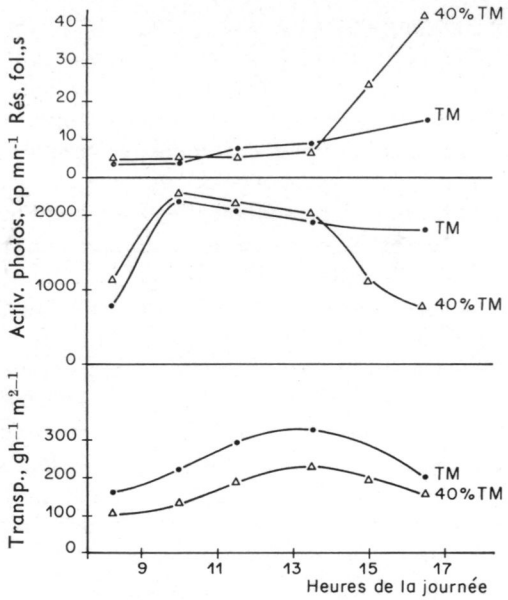


FIG. 9. — *Résistances foliaires et échanges gazeux au cours d'une journée chaude et ensoleillée* (29-07-74), *en conditions TM et* 40 p. 100 *TM*. Rés. fol. = Résistances foliaires ; activ. photos. = Activité photosynthétique, coups min^{-1} cm^{2-1} ; Transp. = Transpirations, $gh^{-1}m^{2-1}$.

Leaves resistance and gas exchanges during a warm and sunny day (29-07-74) *in conditions MT and* 40 p. 100 *MT*. Res. fol. = leaf resistance ; act. photos. = photosynthesis activity, count $minute^{-1}$ cm^{2-1} ; transp. = transpiration gram. hour. m^{2-1}.

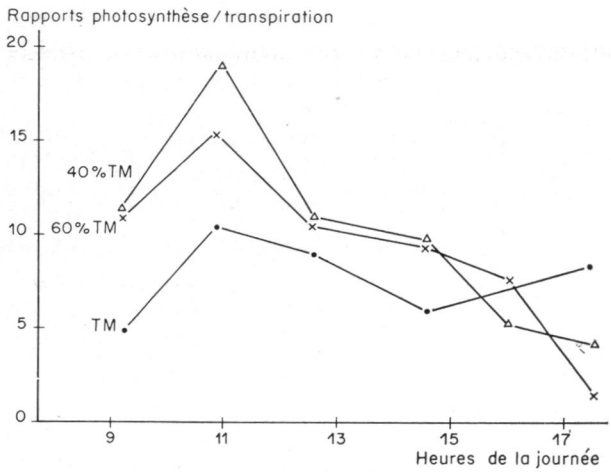


FIG. 10. — *Evolution des rapports* $\frac{photosynthèse}{transpiration}$ *au cours de la journée* (29-07-74) *dans les divers traitements hydriques.*

Evolution of the ratio $\frac{photosynthesis}{transpiration}$ *during the day* (29-07-74) *for the various water treatments.*

Sur l'ensemble du cycle végétatif, la restriction de l'alimentation hydrique conduit à une augmentation modérée mais nette de l'efficience de l'eau consommée, comme l'indique la figure 11 qui regroupe les résultats obtenus au cours de quatre années d'études en vases de végétation.

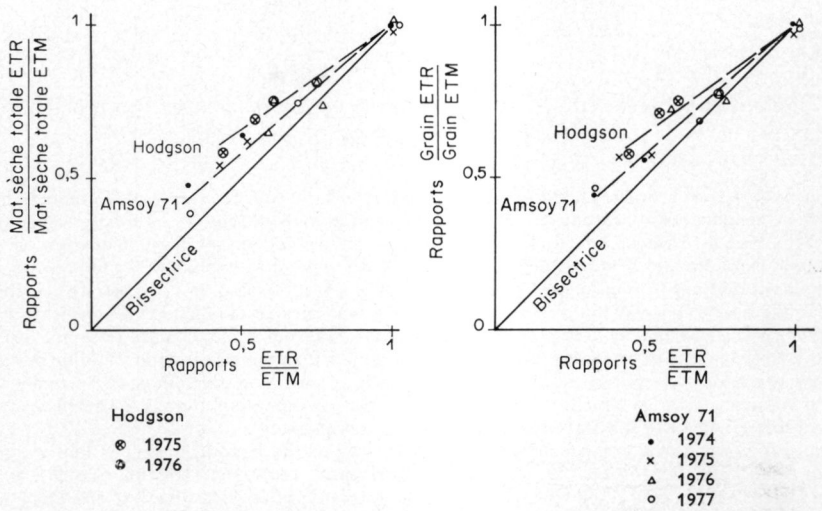


FIG. 11. — *Productions relatives de matière sèche totale et de grains en fonction de l'alimentation hydrique, synthèse de quatre années* (la bissectrice correspond à une influence nulle de l'alimentation hydrique sur l'efficience de l'eau consommée).

Effect of the water supply on the relative total dry matter and seed yield for the four years (the bisector corresponds to a non-influence of the water supply on the efficiency of the used water).

En définitive, nous retrouvons dans ces diverses conditions expérimentales deux faits bien marqués :

— stimulation de l'activité photosynthétique des surfaces foliaires réduites, vraisemblablement par effets d'appel de métabolites (effets de puits, Thorne et Koller, 1974) ; ceux-ci sont notamment susceptibles d'intervenir dans des conditions d'humidité ou à des moments de la journée ne mettant pas en jeu de très fortes transpirations (fig. 8 et 9).

— la réduction de l'alimentation hydrique affecte la transpiration avant la photosynthèse (fig. 10 ; Gelfi *et al.*, 1976) ; une légère fermeture des stomates ne semble pas handicaper fortement la photosynthèse, la résistance stomatique n'étant sans doute pas chez le soja le premier facteur limitant l'activité photosynthétique (Chartier, 1975).

Ces deux effets, qui s'ajoutent, paraissent les principales explications de l'amélioration de l'efficience de l'eau en conditions sèches. Ils expliquent aussi la grande plasticité de cette espèce végétale, capable de s'accommoder de structures très diverses. L'amélioration génétique et la maîtrise agronomique (conduite de l'irrigation notamment) ont certainement avantage à viser l'obtention d'indices foliaires pas trop élevés, de l'ordre de 4 à 6 selon les disponibilités hydriques, et à favoriser le plus possible la fructification. Rappelons enfin que ces conclusions s'appliquent à des sojas à croissance indéterminée, seuls répandus actuellement en France ; il est

possible que des types à croissance déterminée présentent des caractères différents quant au feuillage optimal ; la floraison plus groupée peut en effet conduire à faire davantage appel aux réserves transitoires des feuilles.

Reçu pour publication en juillet 1978.

Summary

Relations between leaf growth, transpiration and production in soya bean (cv Amsoy 71 and Hodgson)

Soya bean (Glycine max. L. Merril) often presents a high leaf area index. The effect obtained by reducing the leaf area was studied in vegetation vessels on two varieties with undetermined growth (Amsoy 71, group II ; Hodgson group I) in excising one or two leaflets per leaf from the formation of the fourth trifoliate leaf onwards and for the rest of the vegetative period. The plants were placed either under conditions of maximum transpiration TM or 75 p. 100 TM or 55 p. 100 TM. A checking of the stomata opening and of the photosynthetic activity was carried out through Shimshi's techniques (1967, 1969). The experiments took place during two very different climatic years 1976 and 1977.

In the absence of water stress the water consumption and the production of total dry matter and beans are nearly proportional to leaf number up to a leaf area index near to 5 ; further, on a threshold value for bean production and then for water consumption (fig. 2) is reached ; the production of total dry matter still increases but no more proportionally.

In case of water stress the leaf area is reduced as well as the transpiration per leaf weight unit (fig. 3) and the bean production (fig. 5). The photosynthetic activity, the ratio bean/total dry matter and the efficiency of the consumed water are higher at low leaf area indices (fig. 6, 7 and 8).

The stimulation of the activity of the reduced leaf areas is due to the pull effect of the metabolites already revealed on soya bean by Thorne and Koller (1974). The reduction of the water supply affects the transpiration before affecting photosynthesis and the efficiency of consumed water is increased.

Soya bean is therefore a very plastic species able to adapt itself to different structures. Through genetical improvement and agronomical command (especially irrigation) it is to be wished to obtain in these undetermined types leaf area indices ranging from 4 to 6 according to the available water.

Zusammenfassung

Beziehungen zwischen der Blattentwicklung, der Ausdünstung und dem Ertrag bei Sojabohne (cv Amsoy 71 und Hodgson)

Sojabohne (Glycine max. L. Merri) zeigt oft einen hohen Blattflächenindex. Die Wirkung einer Verminderung der Blattfläche wurde in Vegetationsgefässen auf zwei Sorten mit unbestimmtem Wachstum (Amsoy 71, Gruppe I ; Hodgson, Gruppe II) durch Abnahme eines oder zwei Blättchen je Blatt von der Bildung des vierten dreiblättrigen Blattes an und während des übrigen Teils der vegetativen Periode untersucht. Die Pflanzen wurden entweder maximaler Ausdünstung TM oder 75 p. 100 TM oder 55 p. 100 TM unterworfen. Kontrolle der Stomatenöffnung und der Photosynthese wurden mit Shimshischen Techniken (1967, 1969) durchgeführt ; die Experimente wurden während zwei klimatisch sehr verschiedenen Jahre. 1976 und 1977, zustande gebracht.

Ohne Wassereinsehränkung sind der Wasserverbrauch und der Ertrag an Gesamttrockensubstanz und Körner ungefähr proportional zur Blattmenge bis zu einem Blattflächenindex von 5 ungefähr ; über diesem Wert erscheint ein Schwellenwert für Kornertrag und danach für den Wasserverbrauch (Abb. 2) ; der Ertrag von Gesamttrockensubstanz nimmt weiter aber weniger als proportional zu.

Mit Wassereinschränkung sind die Blattfläche sowie die Ausdünstung je Blattgewichtseinheit (Abb. 3) und der Kornertrag (Abb. 5) vermindert. Die Photosynthese, das Verhältnis zwischen Korn und Gesamttrockensubstanz und die Leistungsfähigkeit des verbrauchten Wassers sind höher für die niedrigen Blattflächenindices (Abb. 6. 7 und 8).

Die Förderung der Tätigkeit der verminderten Blattflächen kann der schon von Thorne und Koller (1974) auf Sojabohne klargestellten Zugwirkung der Metaboliten zugeschrieben werden.

Die Verminderung der Wasserzufuhr wirkt auf die Ausdünstung und dann auf die Photosynthese und die Leistungsfähigkeit des verbrauchten Wassers ist erhöht.

Sojabohne zeigt deswegen eine sehr gute Anpassungsfähigkeit und kann sich zu verschiedenen Strukturen anpassen. Es scheint wünschenswert, der Wasserverfügbarkeit entsprechend Blattflächenindices zwischen 4 und 6 durch genetische Verbesserung und landwirtschaftliche Beherrschung (insbesondere Bewässerung) für diese unbestimmten Typen zu erzielen.

РЕЗЮМЕ

Связь между развитием листьев, транспирацией и продукцией у сои (сорта Амсой 71 и Ходжсон).

Р. БЛАНШЕ, Н. ЖЕЛЬФИ.

Листовой показатель часто бывает высоким у растений сои (Glycine max. L. Merill). На двух сортах сои с неопределенным ростом (Амсой 71 группа II, и Ходжсон, группа I), после удаления двух из листочков каждого листа в момент появления четвертого трехлисточкового листа, в течении остатка вегетативного цикла, изучался эффект этого сокращения листовой площади. Во время опыта растения находились в условиях максимальной транспирации, или 75-ти и 55-ти р. 100 таковой. По принципам технологии Шимши (1967, 1969) проводился контроль ракрытия устьиц и фотосинтетической активности; опыты длились в течении двух разных по их климатическим условиям лет (1976 и 1977).

В отсутсвии принуждений вызванных условиями влажности, потребление воды растениями и продукция общего сухого вещества и зерна, почти пропорциональны количеству листьев, до тех пор пока листовой показатель не достигнет приблизительно 5-ти; выше этой цифры отмечается появление уровня, сперва для зерна, а затем и для потребления влаги (Рис. 2); продукция общего сухого вещества продолжает, между-тем, увеличиваться в степени меньше чем пропорциональной.

При существовании условий влажности, листовая площадь уменьшается, также как и транспирация на единицу веса листа (Рис. 3) и продукция зерна (Рис. 5). Фотосинтетическая активность, соотношение зерно/общее сухое вещество и эффективность потребленной влаги, повышаются при низких листовых показателях (Рис. 6, 7 и 8).

Стимуляция активности сокращенных листовых площадей вызывается эффектом привлечения метаболитов, уже выявленному в случае сои Торном и Коллером (1974). Ослабление водного питания отзывается на транспирации раньше чем на фотосинтезе и эффективность потребленной влаги-увеличивается.

Соя является значит видом очень пластическим, способным примениться к разным структурам. При помощи генетического отбора и агротехнических приемов (особенно орошения), было-бы желательным получить у этих неопределенных типов сои, листовые показатели равные от 4-х до 6-ти, в зависимости от водной наличности.

Références bibliographiques

BLANCHET R., GELFI N., BOSC M., 1977. Relations entre consommation d'eau et production chez divers types variétaux de soja (*Glycine max*. L. Merr.). *Ann. agron.*, **28,** 261-275.

BOYER J. S., 1970*a*. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.*, **46,** 233-235.

BOYER J. S., 1970*b*. Differing sensivity of photosynthesis to low water potentials in corn and soybean. *Plant Physiol.*, **46,** 236-239.

BOYER J. S., 1976. Photosynthesis at low water potentials. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B, **273,** 501-512.

CHARTIER P., 1975. L'assimilation du CO^2 à l'échelle de la feuille et à celle de la culture. In *Photosynthèse et production végétale*, éd. C. Costes, Gauthier-Villars, Paris, 171-191.

EGLI D. B., LEGGETT J. E., 1976. Rate of dry matter accumulation in soybean seeds with varying source sink ratios. *Agronomy Journal*, **68,** 371-374.

GELFI N., 1975. *Influence des conditions d'alimentation hydrique et azotée sur l'efficience de l'eau et la production chez le soja (variété Amsoy)*. Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse, n° 315, 80 p.

GELFI N., BLANCHET R., BOSC M., 1976. Influence de l'alimentation hydrique sur la transpiration et la photosynthèse du soja (*Glycine max*. L. Merr.) ; conséquences relatives à l'efficience de l'eau consommée. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, D, **283,** 495-498.

HSIAO T. C., ACEVEDO E., 1974. Plant responses to water deficits, water use efficiency, and drought resistance. *Agricultural Meteorology*, 14, 25-29.

MEDERSKI M. J., JEFFERS D. L., PETERS D. B., 1973. Water and water relations, in *Soybeans, improvement, production and uses*. B. E. Caldwell Ed., *Amer. Soc. Agron.*, Madison, U. S. A., 239-266.

MINGEAU M., 1974. Etude de la sensibilité du soja à la sécheresse. *Informations Techniques C.E.T.I.O.M.*, nº 47, 1-14.

PUECH J., LENCREROT P., HERNANDEZ M., 1974. Rôle de quelques facteurs du milieu dans la production qualitative et quantitative du soja.
I. — Croissance, développement et rendements du soja en culture irriguée ou non. *Ann. agron.*, **25,** 659-679.
II. — Influence des conditions écologiques sur la production qualitative du grain. *Ann. agron.*, **25,** 837-858.

PUECH J., BONNAL J.-M., HERNANDEZ M., 1976. Influence de la concurrence intraspécifique sur les modalités de la fructification d'un soja (*Glycine max*. L. Merril) à floraison de type indéterminé. *C. R. Acad. Sc. Paris*, D, **283,** 919-922.

PUECH J., BONNAL J.-M., HERNANDEZ M., 1977. Observations sur l'importance de l'avortement des organes fructifères du soja (*Glycine max*. L. Merril) placé dans différentes conditions écologiques. *C. R. Acad. Sc., Paris*, D, **284,** 2343-2346.

SHIMSHI D., 1967. Some aspects of stomatal behavior as observed by means of an improved pressuredrop porometer. *Israël Journal of Botany*, **16,** 19-28.

SHIMSHI D., 1969. A rapid field method for measuring photosynthesis with labelled carbon dioxide. *Israël Journal of Botany*, **20,** 381-401.

Station d'Agronomie, 1974. *Le soja*, compte rendu des travaux réalisés, 88 p.

Station d'Agronomie, Toulouse, 1978. *Le soja, fonctionnement et maîtrise de la culture*, compte rendu des travaux réalisés, 133 p.

TEIGEN J.-B., VORST J.-J., 1975. Soybean response to stand reduction and defoliation. *Agronomy Journal*, **67,** 813-816.

THORNE J.-H., KOLLER H.-R., 1974. Influence of assimilate demand on photosynthesis diffusive resistances, translocation and carbohydrate levels of soybean leaves. *Plant Physiology*, **54,** 201-207.

Ann. agron., 1978, **29** (3), 243-256.

Etudes préliminaires du rôle de la nature des matières organiques dans les phénomènes d'adsorption des herbicides

P. GAILLARDON, R. CALVET (1), Elisabeth ROUGETET et J. C. GAUDRY

Laboratoire de Malherbologie,
Centre de Recherches agronomiques de Dijon, I.N.R.A.,
BV 1540, 21034 Dijon

(1) *Station de Science du sol,*
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
Route de Saint-Cyr, 78000 *Versailles*

Résumé

L'adsorption de la terbutryne et du diuron par un sol argilo-limoneux est augmentée par l'addition de matières organiques (paille de blé ou de luzerne). La fragmentation de celles-ci n'a pas d'effet. L'importance de ce phénomène dépend par contre de la nature de l'herbicide et de celle de la matière organique apportée dont la décomposition entraîne en outre une variation de la capacité d'adsorption du sol. Cette variation dépend du type de la matière organique et de la nature chimique de l'herbicide.

Introduction

Les études concernant l'adsorption des herbicides par les sols font fréquemment ressortir le rôle des matières organiques à l'égard de ce phénomène (Hance, 1965 ; Talbert et Fletchall, 1965 ; Liu *et al.*, 1970 ; Jamet et Piedallu, 1975). Ces dernières sont capables d'adsorber les herbicides (Bouchet, 1967 ; Sullivan et Felbeck, 1968 ; Weber *et al.*, 1969 ; Khan et Mazurkewich, 1974) et cette propriété varie : elle pourrait dépendre de la nature des matières organiques et notamment de leur degré d'évolution (Walker et Crawford, 1968 ; Doherty et Warren, 1969 ; Osgerby, 1973 ; Moreale *et al.*, 1977).

Dans le sol, les matières organiques constituent un ensemble complexe qui évolue grâce aux phénomènes de minéralisation et d'humification. On distingue schématiquement (Mangenot, 1970) les matières organiques fraîches (libres), qui comprennent les matières organiques non décomposées et en cours de décomposition, et les matières organiques humifiées (généralement liées aux argiles), les limites entre ces classes étant mal précisées. La nature des matières organiques peut ainsi se définir par leur composition quantitative et qualitative qui est toutefois difficile à caractériser.

Nous avons d'abord considéré l'effet des matières organiques non décomposées, représentées par deux matériaux organiques (la paille de blé et le foin de luzerne), sur l'adsorption de trois herbicides (terbutryne, diuron, isoproturon) dans le sol. Nous avons d'autre part cherché à apprécier le rôle des différentes fractions qui peuvent composer les matières organiques en provoquant la décomposition des mêmes matériaux et en déterminant parallèlement les variations des propriétés adsorbantes à l'égard de la terbutryne et du diuron.

Matériel et Méthodes

1. — *Les herbicides utilisés*

La terbutryne (2-méthylthio-4-éthylamino-6-t-butylamino-1,3,5 triazine) est contenue dans un produit formulé (igrane) à 50 p. 100 de matière active. Le diuron purifié (N-(3,4-dichlorophényl)-N', N'-diméthylurée) est obtenu par recristallisation du diuron technique fourni par la Sté du Pont de Nemours. L'isoproturon purifié (N-(isopropyl-4-phényl)-N', N'-diméthylurée) est fourni par la Sté Rhône-Poulenc. La stabilité chimique de ces herbicides est suffisante pour qu'on puisse exclure leur dégradation pendant les mesures de l'adsorption.

2. — *Mesure de l'adsorption*

Toutes les mesures d'adsorption sont obtenues par contact entre 5 g d'adsorbant et 30 ml de solution herbicide de concentration initiale connue ou 30 ml d'eau distillée pour les témoins. Les suspensions sont agitées pendant 24 h (temps suffisant pour assurer l'équilibre d'adsorption dans le cas du sol utilisé et d'un terreau) puis les deux phases sont séparées par centrifugation, suivie si nécessaire d'une filtration sur miracloth. La mesure de la concentration de l'herbicide restant dans le surnageant permet de déterminer, par différence, la quantité d'herbicide adsorbée et de calculer un coefficient de distribution K = quantité d'herbicide fixée par unité de masse de l'adsorbant (10^{-6} M kg^{-1})/concentration de l'herbicide dans la solution à l'équilibre (10^{-6} M). Le dosage de la terbutryne est réalisé par chromatographie en phase gazeuse (Gaillardon, 1975). Dans le cas des phénylurées, on prélève 5 ml de surnageant dont on extrait l'herbicide par deux fois 10 ml de chloroforme ; la fraction chloroformique est évaporée à sec et le résidu repris avec 10 ml de méthanol. Les herbicides sont dosés dans la solution méthanolique par spectrophotométrie à 250 nm (diuron) et 242 nm (isoproturon) en tenant compte de l'absorption des témoins sans herbicides, avec une erreur de 0,1 μg/ml. Les mesures sont effectuées avec deux ou trois répétitions.

3. — *Rôle des matières organiques non décomposées*

Nous avons essentiellement cherché à préciser les quantités à partir desquelles les matières organiques non décomposées peuvent modifier l'adsorption des herbicides dans le sol. Nous avons ainsi comparé les propriétés adsorbantes d'un sol argilo-limoneux (composition granulométrique : sable 7 p. 100, limons 60 p. 100, argiles

33 p. 100 ; teneur en matières organiques : 2,5 p. 100 ; pH dans l'eau distillée : 7,5), séché à l'air et passé au tamis de 2 mm, seul ou enrichi avec deux substrats organiques : farines de paille de blé (tiges + feuilles) ou de foin de luzerne (plantes au stade début floraison). Celles-ci sont obtenues par broyage au mixeur des matériaux organiques secs (nous avons retenu la fraction fine inférieure à 0,5 mm) et se caractérisent par un rapport C/N de 90 et 11,4 et une teneur en carbone de 43 et 46 p. 100 respectivement. Elles sont ajoutées au sol à raison de 0-0,5-1 et 5 p. 100 afin d'obtenir 100 g de mélange puis on détermine les quantités de terbutryne, diuron et isoproturon adsorbées par chaque mélange. Les concentrations initiales des herbicides sont respectivement 87, 81 et 138 $\times$ 10^{-6} M.

L'effet de la fragmentation des matières organiques non décomposées est également considéré en comparant, comme précédemment, les propriétés adsorbantes du sol argilo-limoneux enrichi, à raison de 10 p. 100, avec des matériaux organiques voisins des précédents (tiges de paille de blé et foin de luzerne au stade fructification) soumis à trois temps de broyage différents. Tous les fragments sont conservés et classés selon leurs dimensions au moyen de tamis. Les concentrations initiales des herbicides sont respectivement 71 et 82 $\times$ 10^{-6} M pour la terbutryne et le diuron.

4. — *Rôle des fractions qui composent les matières organiques*

En provoquant la décomposition des substrats organiques, on peut, dans une certaine mesure, reproduire les processus d'évolution qui conduisent aux diverses fractions constitutives des matières organiques du sol. Pour préciser le rôle de ces fractions dans les phénomènes d'adsorption des herbicides, nous avons tenté de relier l'évolution des substrats à celle de leurs propriétés adsorbantes à l'égard de la terbutryne et du diuron.

On introduit dans des erlens 100 g de mélanges constitués à partir du sol argilo-limoneux ou du sable de Fontainebleau (inférieur à 0,5 mm) et contenant la farine de paille de blé ou de foin de luzerne, à raison de 5 ou 15 p. 100. Les erlens sont fermés au moyen d'un tissu miracloth perméable aux gaz. Les mélanges contenant la paille reçoivent un complément d'azote minéral (sulfate d'ammonium) permettant de ramener à 26 la valeur du rapport C/N de celle-ci. Les mélanges composés avec le sable reçoivent en outre 10 ml d'un extrait aqueux du sol argilo-limoneux, obtenu par centrifugation d'une suspension de 20 g de sol dans 200 ml d'eau après 2 h de contact, servant d'inoculum, plus 10 ml de milieu liquide de culture pour *E. coli* (Cohen et Rikenberg, 1956) sans carbone et sans azote comme complément minéral non spécifique. Le sable n'adsorbant pas les herbicides, des témoins comprenant le sol argilo-limoneux seul sont mis en place afin de déterminer ses propriétés adsorbantes et, par comparaison avec les mélanges, d'évaluer le pouvoir adsorbant spécifique des substrats ajoutés. Les taux d'humidité du sable, du sol et des substrats sont fixés arbitrairement à 10, 20 et 200 p. 100 par rapport aux poids secs, ce qui correspond aux deux tiers environ de leur capacité de rétention. La quantité totale d'eau ajoutée dans chaque erlen est donc celle qui permet d'amener les composants du mélange considéré à leurs taux d'humidité respectifs. La décomposition des substrats s'effectue à la température du laboratoire (20 $\pm$ 2 °C) et, pour chaque condition, un nombre suffisant d'erlens est prévu pour permettre quatre prélèvements après le départ de l'expérience mais sans répétition.

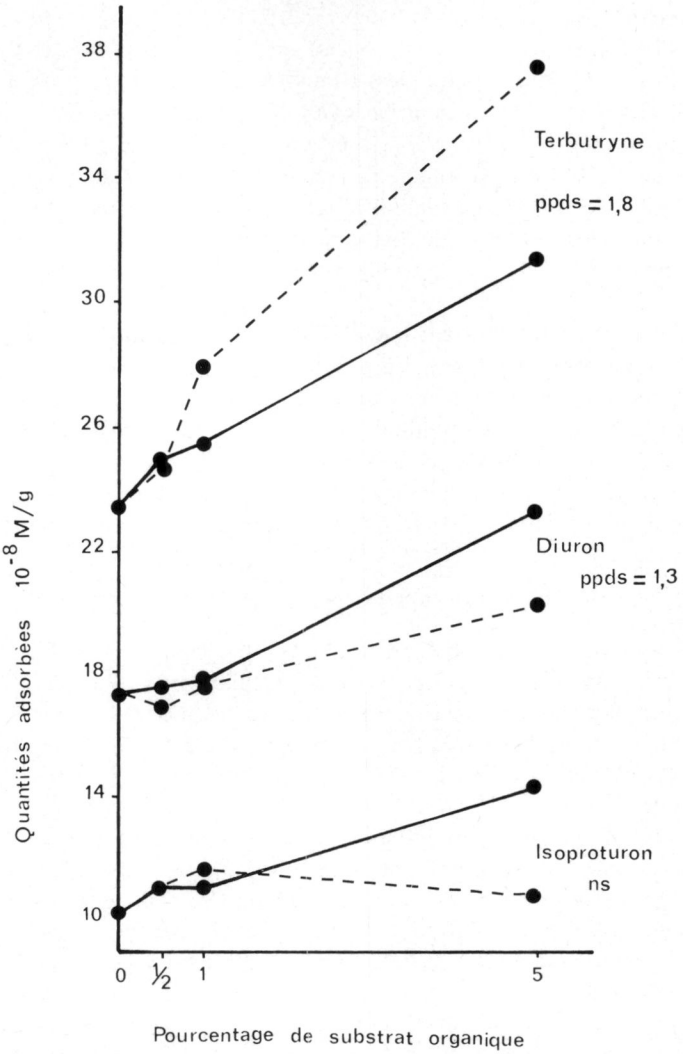


FIG. 1. — *Quantités d'herbicides adsorbées par le sol argilo-limoneux enrichi avec les farines de paille (traits pleins) et de luzerne (pointillés).*

Adsorption of herbicides by a clay-loam soil containing ground wheat straw (continuous line) or lucern (broken line).

A intervalles réguliers, les contenus d'une série d'erlens sont récupérés, séchés pendant 72 h à 45 °C puis broyés au mortier et conservés à température ordinaire. Dans les erlens restants, l'humidité des mélanges est rétablie en tenant compte des variations du poids sec attribuées à la minéralisation des substrats organiques, sur la base des taux d'humidité définis pour chaque constituant.

L'évolution des matières organiques est caractérisée uniquement d'un point de vue quantitatif par la détermination, pour chaque mélange et à chaque prélèvement, de la teneur en carbone organique total dont les variations résultent des phénomènes de minéralisation. Les dosages du carbone sont effectués par la méthode Anne (1945)

et chaque mesure comporte deux répétitions. Parallèlement nous avons déterminé, pour chaque mélange, les quantités de terbutryne et de diuron adsorbées ainsi que les valeurs du coefficient de distribution. A cet effet, les concentrations des solutions herbicides utilisées étaient initialement, pour le diuron 107×10^{-6} M et pour la terbutryne, elles variaient légèrement d'un prélèvement à l'autre : 106, 98, 99, 91 et 119×10^{-6} M dans l'ordre des prélèvements.

Résultats

1. — *Effets des matières organiques non décomposées sur l'adsorption*

La figure 1 représente les quantités de terbutryne, de diuron et d'isoproturon adsorbées par le sol argilo-limoneux enrichi avec les farines de paille ou de luzerne. D'une manière générale les trois herbicides sont adsorbés dans l'ordre décroissant : terbutryne > diuron > isoproturon et la présence des substrats organiques se traduit par un accroissement des quantités d'herbicides adsorbées par rapport au sol. Dans le cas de la terbutryne, cette augmentation est significative dès que les mélanges contiennent 1 p. 100 de substrats et elle est plus forte en présence de luzerne. Avec le diuron, l'augmentation n'est significative que pour les mélanges à 5 p. 100 et c'est alors la paille qui provoque un effet sensiblement plus grand. Enfin pour l'isoproturon, les différences ne sont pas significatives mais l'effet des substrats ressemble à celui que l'on observe avec le diuron.

Le tableau 1 montre d'une part l'état de fragmentation des matériaux organiques

TABLEAU 1

Répartition pondérale, en pourcents, des fragments des matériaux organiques, classés selon leur taille, ajoutés à raison de 10 p. 100 *au sol argilo-limoneux et quantités de terbutryne et de diuron adsorbées par les mélanges correspondants*

Distribution (p. 100 *weight*) *of the organic fragments classified according to their size and added* (*at* 10 p. 100 *rate*) *to a clay-loam soil and adsorption of terbutryne and diuron by corresponding mixtures*

Distribution		Répartition pondérale, en p. 100, selon la taille des fragments				Quantités d'herbicides adsorbées 10^{-6} M/g	
		Distribution of the organic fragments				Absorbed herbicides	
		> 2 mm	1-2 mm	0,5-1 mm	< 0,5 mm	Terbutryne	Diuron
Paille	1	63	27	8	2	0,24	0,30
Wheat straw	2	3	55	31	11	0,25	0,29
	3	0	7	69	24	0,24	0,29
Luzerne	1	32	21,5	21,5	25	0,31	0,26
Lucern	2	6	19	32	43	0,29	0,27
	3	7	8	29	56	0,31	0,27

ajoutés au sol et d'autre part les quantités de terbutryne et de diuron adsorbées par les mélanges. Pour chacun des matériaux, il apparaît que les quantités de terbutryne ou de diuron adsorbées ne varient pas avec la fragmentation.

2. — *Evolution des matières organiques*

La figure 2 montre les variations de la teneur en carbone total des mélanges. Le carbone organique du sol, qui correspond essentiellement à des matières organiques humifiées, ne varie pratiquement pas d'un point de vue quantitatif. Quelle que soit la nature des mélanges, on observe classiquement une minéralisation rapide suivie d'une évolution très lente de la teneur en carbone total. La minéralisation est plus intense en présence de luzerne.

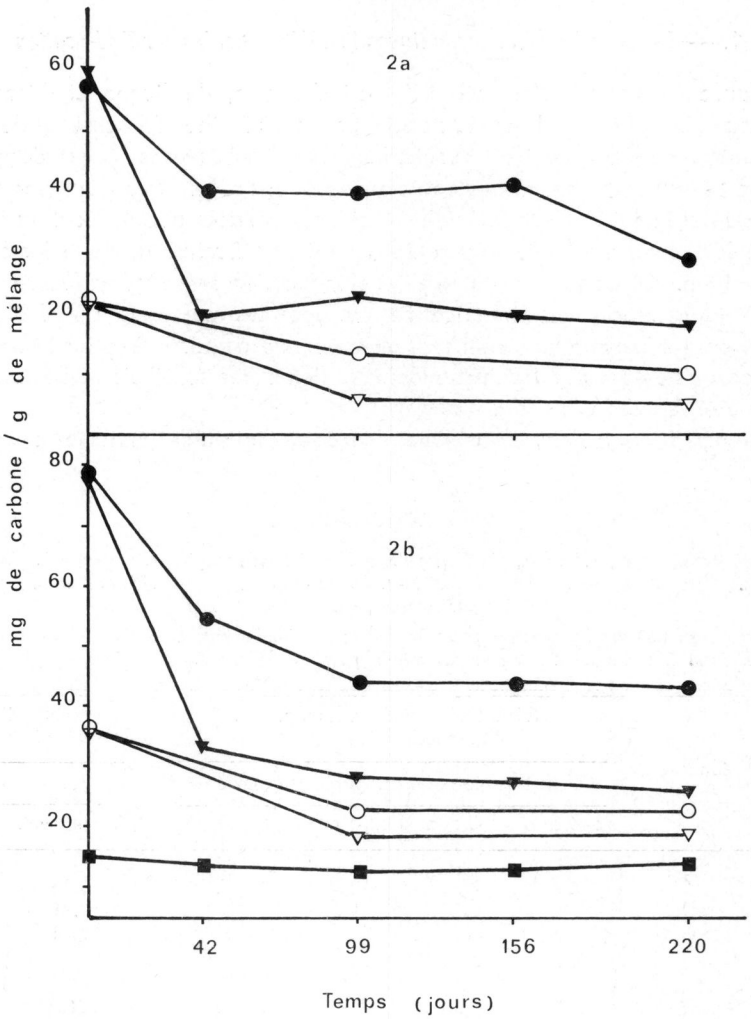


FIG. 2. — *Evolution de la teneur en carbone organique — des mélanges composés avec le sable (2a) — du sol argilo-limoneux et de ses mélanges (2b). Représentation symbolique : sol (■) ; mélanges contenant la farine de paille à raison de* 5 p. 100 (○) *et* 15 p. 100 (●) ; *mélanges contenant la farine de luzerne à raison de* 5 p. 100 (▽) et 15 p. 100 (▼).

Evolution of the amount of organic carbon — in mixtures composed of sand (2a) — in a clay-loam soil and its mixtures (2b). Symbols : soil (■) ; mixtures with ground wheat straw at 5 p. 100 (○) *and* 15 p. 100 (●); *mixtures with lucern at* 5 p. 100 (▽) and 15 p. 100 (▼).

La transformation des substrats organiques dans les mélanges s'accompagne de variations du pH : l'évolution de la paille tend à acidifier le milieu et celle de la luzerne augmente le pH. Ces variations sont plus importantes dans le sable où le pH déterminé dans les surnageants au moment des mesures de l'adsorption peut atteindre les valeurs 5,5 et 9,4. Elles sont fortement atténuées dans le sol, en raison de son pouvoir tampon, qui limite les valeurs du pH entre 6,9 et 8,1.

3. — *Variations du pouvoir adsorbant des mélanges*

Pour des raisons de simplicité, nous avons caractérisé le pouvoir adsorbant des mélanges à l'égard des herbicides au moyen du coefficient de distribution (K). Celui-ci est totalement représentatif du phénomène d'adsorption lorsque les isothermes d'adsorption sont linéaires, ce que nous avons vérifié pour le sol seulement. La figure 3 montre les variations, en fonction du temps, des coefficients de distribution relatifs à la terbutryne et au diuron, établis pour les mélanges composés avec le sol et riches en substrats organiques.

Nous pouvons comparer, pour chaque mélange, les valeurs du pouvoir adsorbant aux différents prélèvements, et, à chaque prélèvement, le pouvoir adsorbant des différents mélanges. Les intervalles de confiance (t 0,05) correspondant à ces deux séries de comparaisons : $ppds_1$ et $ppds_2$, figurent numériquement, entre parenthèses, sur les graphiques lorsque les écarts sont significatifs. Il est possible de faire plusieurs remarques :

— Le pouvoir adsorbant du sol, à l'égard du diuron, ne varie pas significativement alors qu'il accuse un fléchissement aux deuxième et troisième prélèvements à l'égard de la terbutryne.

— L'évolution des mélanges contenant la luzerne ou la paille s'accompagne respectivement d'une diminution ou d'une tendance à l'augmentation de leur pouvoir adsorbant à l'égard des deux herbicides, ces variations n'étant toutefois significatives que pour la terbutryne.

— Le pouvoir adsorbant des mélanges est généralement supérieur à celui du sol et l'effet de la paille sur l'adsorption est plus grand que celui de la luzerne, à l'exception de la luzerne non décomposée qui provoque une forte adsorption de la terbutryne.

Le pouvoir adsorbant des mélanges à faible proportion de substrats organiques et des mélanges composés avec le sable n'est pas représenté sur les graphiques. Les résultats sont comparables à ceux que nous venons de présenter mais lorsqu'on considère les mélanges pauvres en substrats, les différences, plus faibles, sont plus rarement significatives.

4. — *Variations du pouvoir adsorbant du carbone organique des mélanges*

Au cours de l'expérience, les variations simultanées des quantités de carbone organique et des valeurs du pouvoir adsorbant nous conduisent à utiliser le rapport $K \times 100$/teneur en carbone organique. Ce rapport fournit une estimation du pouvoir adsorbant moyen du carbone organique et ses variations traduisent l'effet d'une évolution qualitative des matières organiques sur l'adsorption des herbicides. En présence de sol on obtient une surestimation du pouvoir adsorbant du carbone dans la mesure

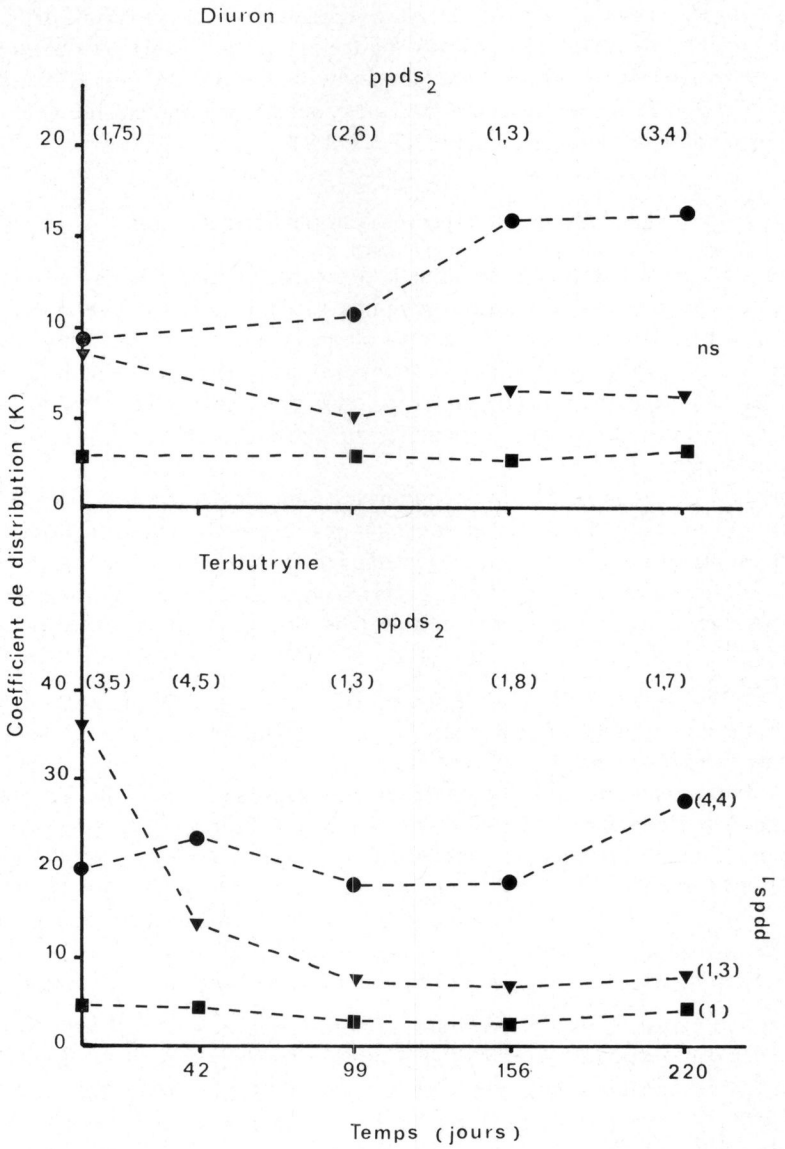


FIG. 3. — *Variations du pouvoir adsorbant, à l'égard de la terbutrybe et du diuron, du sol argilo-limoneux* (■) *et de ses mélanges avec les farines de paille* (●) *ou de luzerne* (▼), *à raison de* 15 p. 100. *Les intervalles de confiance* $ppds_1$ *concernent les variations du pouvoir adsorbant de chaque mélange en fonction du temps ; les intervalles de confiance* $ppds_2$ *concernent les valeurs du pouvoir adsorbant des mélanges à chaque prélèvement (ns. : différences non significatives).*

Changes in adsorption of terbutryne and diuron by a clay-loam soil (■) *and its mixtures with ground wheat straw* (●) *or lucern* (▼) *at* 15 p. 100. 95 p. 100 *confidence limits* $ppds_1$ *refers to changes for each mixture as a function of time and* $ppds_2$ *refers to the values of adsorption of herbicides by the mixtures at each sampling (ns = no significant differences).*

où la fraction minérale du sol serait également capable d'adsorber les herbicides. Dans notre interprétation des résultats, nous considérerons, sans distinction, que le pouvoir adsorbant du carbone organique du sol inclut les propriétés adsorbantes des minéraux qui lui sont associés. La figure 4 montre, en fonction du temps, les variations du pouvoir adsorbant du carbone organique des mélanges composés avec le sol et riches en substrats organiques.

Des comparaisons, analogues à celles qui concernent les résultats présentés sur la figure 3, permettent les remarques suivantes :

— Le pouvoir adsorbant du carbone organique du sol ne varie pas significativement à l'égard du diuron ; il accuse un fléchissement aux deuxième et troisième prélèvements à l'égard de la terbutryne.

— Au cours de l'expérience le pouvoir adsorbant du carbone organique des mélanges contenant la paille augmente ; celui des mélanges contenant la luzerne augmente si l'on considère le diuron mais diminue puis remonte sensiblement dans le cas de la terbutryne.

— A l'origine le pouvoir adsorbant du carbone organique du sol est généralement plus grand que celui des mélanges contenant les substrats organiques non décomposés ; la comparaison s'inverse au cours du temps, plus particulièrement en présence de paille.

— Le mélange contenant la luzerne présente, à l'égard de la terbutryne, un comportement différent : le pouvoir adsorbant de son carbone organique est initialement plus grand que celui du sol et s'en rapproche rapidement.

La détermination du pouvoir adsorbant du carbone organique des mélanges à faible proportion de substrats et des mélanges composés avec le sable fait apparaître des variations comparables à celles que nous venons de décrire.

Discussion

L'accroissement des quantités d'herbicides adsorbées par le sol argilo-limoneux enrichi avec les farines de paille ou de luzerne apparaît pour des teneurs en substrats organiques non décomposés relativement fortes et dépend de l'herbicide considéré. Nos observations suggèrent que les herbicides étudiés sont plus adsorbés par les substrats organiques que par le sol et que l'affinité des herbicides pour les substrats diminue dans l'ordre : terbutryne $>$ diuron $>$ isoproturon. Ces remarques, jointes au fait que la nature du substrat influence également l'adsorption, montrent qu'il existe probablement des interactions spécifiques entre les matières organiques non décomposées et les herbicides.

La fragmentation de la paille de blé et du foin de luzerne ajoutés au sol n'a pas d'incidence sur les quantités de terbutryne et de diuron fixées. Les matériaux organiques considérés peuvent être assimilés à des parallélépipèdes très aplatis qui se fragmentent en conservant approximativement la même épaisseur ; l'augmentation de surface qui en résulte est alors limitée. On peut encore penser que les herbicides diffusent à l'intérieur des « structures organiques » de sorte que, dans nos conditions expérimentales, l'étendue de la surface externe des matériaux en contact avec les

solutions herbicides, influencerait peu l'adsorption sinon en modifiant la cinétique des phénomènes. Dans cette expérience on peut noter que les quantités de terbutryne et de diuron adsorbées par les mélanges sont voisines (tabl. 1). Cette différence, par rapport à la première expérience, peut être attribuée à la concentration initiale du diuron qui est légèrement plus élevée que celle de la terbutryne mais également à la différence d'origine donc probablement de composition chimique des matériaux organiques. Ce dernier élément pourrait jouer un rôle déterminant dans la spécificité des interactions entre les herbicides et les matières organiques non décomposées.

Le nombre réduit de mesures ne permet pas de faire une analyse détaillée des variations du pouvoir adsorbant des mélanges et de leur carbone organique au cours du temps. La forme des courbes correspondantes est toutefois assez régulière pour nous permettre de dégager les tendances générales.

Les variations du pouvoir adsorbant du carbone du sol à l'égard de la terbutryne sont difficiles à expliquer. Pour les mélanges, l'évolution des substrats s'accompagne d'une variation du pouvoir adsorbant moyen du carbone organique qui dépend de l'herbicide et du substrat ajouté.

La décomposition des substrats entraîne une variation du pH qui peut influencer l'adsorption des herbicides, notamment la terbutryne dont le pK_a est élevé (4,1), et être pour une part responsable des modifications du pouvoir adsorbant du carbone. Compte tenu de résultats antérieurs (Gaillardon, 1975 ; Gaillardon *et al.*, 1977) on peut penser que les valeurs du pH sont trop élevées et leurs variations faibles pour expliquer complètement les phénomènes observés.

Dans le cas des mélanges composés avec le sable on peut ainsi considérer que les variations du pouvoir adsorbant du carbone résultent effectivement de la transformation qualitative des substrats.

Pour les mélanges composés avec le sol, le carbone présent a deux origines : le sol et les substrats. Nous admettrons, pour simplifier, que par rapport aux phénomènes d'adsorption, ces deux catégories de substances ne présentent pas d'interaction entre elles et que le sol des mélanges se comporte comme le sol seul. Si l'on compare le pouvoir adsorbant du carbone des mélanges à celui du sol (fig. 4) au départ de l'expérience, on peut conclure que le pouvoir adsorbant du carbone des substrats organiques non décomposés, à l'égard des deux herbicides, est inférieur à celui du sol à l'exception de la luzerne vis-à-vis de la terbutryne. La figure 2 montre que le carbone du sol est beaucoup plus stable que celui des substrats. Les proportions de carbone correspondant respectivement au sol et aux substrats vont donc varier par suite des phénomènes de minéralisation mais nos conditions expérimentales ne permettent pas de les établir avec précision. Cette variation de composition des mélanges peut expliquer partiellement les variations du pouvoir adsorbant moyen du carbone. On remarque cependant que le pouvoir adsorbant du carbone des mélanges rejoint ou dépasse celui du sol alors que les mélanges contiennent encore une quantité importante de carbone provenant des substrats. On peut alors admettre que les variations du pouvoir adsorbant moyen du carbone des mélanges résultent également de la transformation qualitative des substrats organiques. Celle-ci se traduit pour la paille par une augmentation de son pouvoir adsorbant et pour la luzerne par une augmentation ou une diminution selon l'herbicide, diuron ou terbutryne, considéré.

La discussion qui précède nous conduit à attribuer une part de la variation du

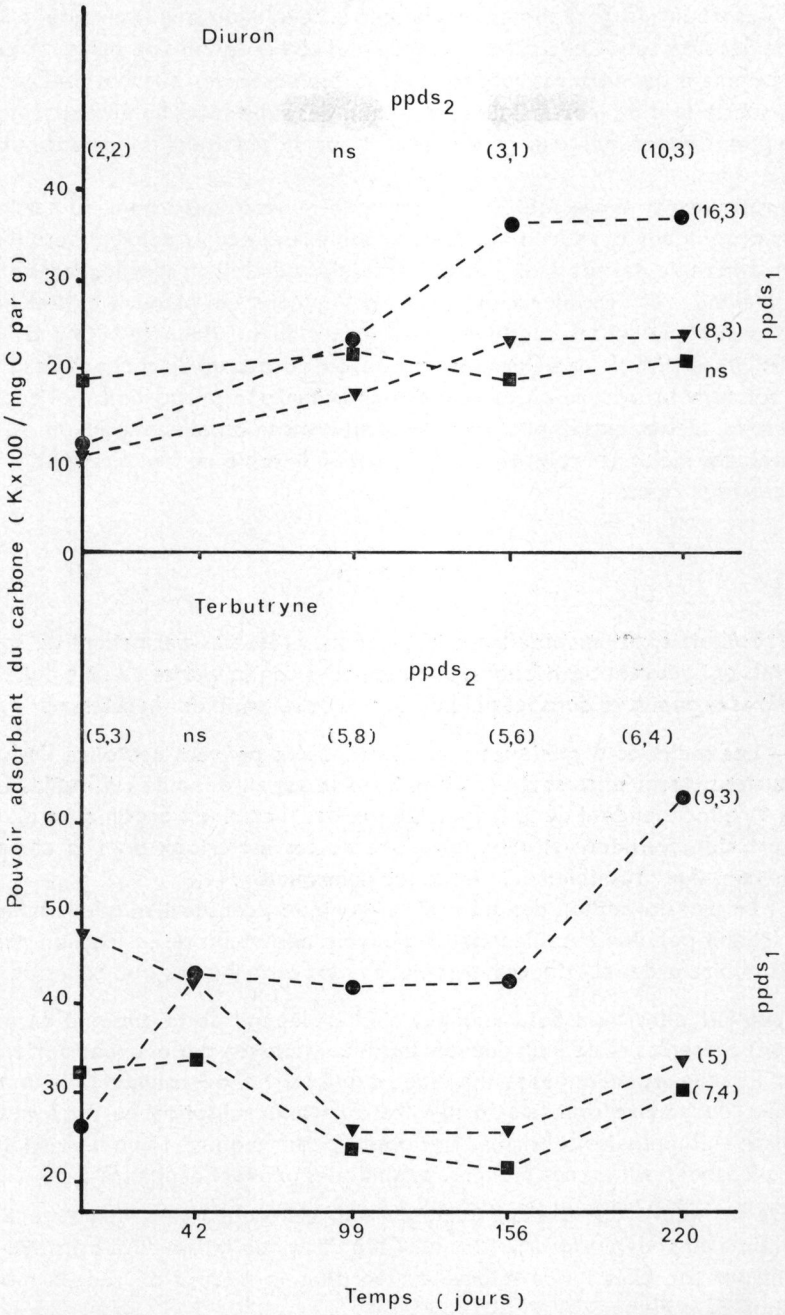


FIG. 4. — *Variations du pouvoir adsorbant, à l'égard de la terbutryne et du diuron, du carbone organique du sol argilo-limoneux (■) et de ses mélanges avec les farines de paille (●) ou de luzerne (▼), à raison de 15 p. 100. Les intervalles de confiance $ppds_1$ et $ppds_2$ ont la même signification que pour la figure 3 (ns : différences non significatives).*

Changes in adsorption of terbutryne and diuron by organic carbon of a clay-loam soil (■) and its mixtures with ground wheat straw (●) or lucern (▼) at 15 p. 100. The meaning of confidence limits $ppds_1$ and $ppds_2$ is the same as in figure 3.

pouvoir adsorbant du carbone des mélanges à l'évolution qualitative de la fraction résiduelle des substrats. Celle-ci correspond à des composés plus ou moins transformés issus directement des substrats organiques, la biomasse des microorganismes et les produits spécifiques de leur métabolisme, enfin des substances humifiées néoformées. Nos conditions expérimentales ne permettent pas de préciser l'importance et le rôle de ces fractions.

Il serait encore intéressant de comparer le pouvoir adsorbant du carbone des substrats organiques dans le sol et dans le sable. Les écarts peuvent résulter d'une évolution différente des substrats liée aux conditions du milieu, particulières à chaque type de mélange, et des interactions physicochimiques qui peuvent exister entre les matières organiques et les constituants minéraux du sol (Hance, 1969 ; Gaillardon *et al.*, 1977). Il est difficile de déterminer le pouvoir adsorbant du carbone des substrats dans le sol dans la mesure où ce carbone constitue une proportion mal connue du carbone total. Des calculs approchés et la comparaison directe du pouvoir adsorbant du carbone des mélanges composés avec le sol ou le sable ne font pas apparaître des différences importantes.

Conclusions

Les résultats expérimentaux que nous avons présentés permettent de souligner deux points qui peuvent contribuer à une meilleure connaissance du rôle de la qualité des matières organiques dans les phénomènes d'adsorption des herbicides.

1. — Les matières organiques non décomposées peuvent accroître l'adsorption des herbicides lorsqu'elles sont présentes dans le sol en quantité suffisante. Cet effet pourrait être indépendant de la fragmentation des matériaux organiques mais varie avec l'herbicide considéré et avec la nature de ces matériaux dont la composition chimique constitue probablement un facteur déterminant.

2. — La transformation des substrats organiques, consécutive à leur minéralisation, se traduit par une modification du pouvoir adsorbant de la fraction résiduelle et peut conduire à des substances organiques plus adsorbantes que celles de départ.

Le pouvoir adsorbant des mélanges étudiés dépend de la quantité de matières organiques présentes et de leur pouvoir adsorbant moyen qui peuvent varier simultanément lorsque les mélanges sont le siège d'une activité microbienne. Les variations du premier paramètre sont liées à la vitesse de minéralisation en rapport avec la composition chimique des substrats. Nos observations montrent que les variations du pouvoir adsorbant moyen des matières organiques peuvent dépendre :

a) De la nature du substrat qui agit — directement par son influence sur la valeur initiale du pouvoir adsorbant et sur l'évolution qualitative du substrat et — indirectement par son effet sur la minéralisation dans la mesure où celle-ci modifie la composition du mélange.

b) De la nature de l'herbicide qui peut présenter une affinité particulière pour certains constituants des matières organiques. Ainsi schématiquement, le diuron et la terbutryne ont une forte affinité pour la fraction relativement stable de la paille mais seule la terbutryne présente une grande affinité pour la fraction facilement minéralisable de la luzerne.

Ces premières observations nous incitent à attirer l'attention sur les techniques simplifiées de travail du sol qui favorisent l'accumulation des matières organiques à la surface du sol (Monnier *et al.*, 1976) en raison d'une diminution possible de l'efficacité des traitements herbicides appliqués sur ces sols. Enfin elles confirment que le critère « teneur en matières organiques », largement utilisé pour apprécier la capacité d'adsorption d'un sol à l'égard des herbicides, doit être nuancé puisqu'il faut tenir compte de la qualité des matières organiques.

Reçu pour publication en juillet 1978.

Summary

Preliminary studies of the role played by the nature of the organic matter in herbicide adsorption phenomenon.

Increased adsorption of terbutryne and diuron is observed when organic matter (wheat or lucern straw) is added to a clay-loam soil. The fragmentation of the organic material has no effect. However, this phenomenon depends on the nature of the herbicide and on the nature of the added organic matter. Its decomposition entails a variation of the soil adsorption capacity. This variation depends on the organic matter type and on the chemical nature of the studied herbicides.

Zusammenfassung

Voruntersuchungen der Rolle der Beschaffenheit der organischen Substanzen in der Herbizidenadsorption

Ein toniger Lehmboden adsorbiert grössere Mengen von Terbutryne, Diuron und im kleineren Masstab Isoproturon, wenn er mit zwei organischen Substraten (Korn- oder Luzernestrohmehl) angereichert ist. Dieser Effekt scheint unabhängig von der Zerkleinerung der beigefügten organischen Substanzen zu sein, aber variert zugleich mit der Beschaffenheit des Herbizids und der Substraten. Es gibt wahrscheinlich spezifische Wechselwirkungen zwischen den nicht zersetzten organischen Substanzen und den Herbiziden. Die Zersetzung der selben Substraten im Boden oder im Sand bewirkt eine Variation des Adsorptionsvermögens des restlichen Kohlenstoffes in den Substraten, die einer qualitativen Anderung dieser Substraten zugeschrieben ist. Diese Beobachtung hängt insbesondere von dem Substrat, dessen Beschaffenheit das anfängliche Adsorptionsvermögen und die Anderung desselben bestimmt, und von dem Herbizid ab, das eine besondere Afinität für bestimmte Bestandsteile der organischen Substanzen aufweisen kann.

РЕЗЮМЕ

Предварительное изучение роли природы органических веществ в явлениях адсорбции гербицидов.

П. ГАЙАРДОН, Р. КАЛЬВЕ, Елизавета РУЖЕТЕ, Х. К. ГОДРИ.

Суглинистая почва адсорбирует крупные количества требутрина и диурона, и, в меньшей степени изопротурон, в случаях когда этот последний обогащен органическими субстратами (мука из пшеничной соломы, мука из люцерны). Эффект этот, как-будто не зависит от степени раздробления прибавляемых органических веществ и меняется в зависимости от природы гербицида и субстратов. Но существуют также наверное специфические взаимодействия между неразложившимися органическими веществами и гербицидами. Разложение одних

и тех-же субстратов в почве или песке вызывает изменение силы адсорбции их остаточного углерода, приписываемое их количественной эволюции. Явление это зависит в первую очередь от природы субстрата, определяющей начальную силу адсорбции и ее эволюцию, а также и от гербицида, у которого может существовать особое сродство с некоторыми из компонентов органических веществ.

Références bibliographiques

ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, Série A, 161-172.

BOUCHET F., 1967. Etude de l'influence de la nature du sol sur l'action herbicide de la simazine. *Weed Res.*, **7,** 102-116.

COHEN G. N., RIKENBERG H. V., 1956. Concentration spécifique réversible des amino-acides chez E. coli. *Ann. de l'Institut Pasteur*, **91,** 673-720.

DOHERTY P. J., WARREN G. F., 1969. The adsorption of four herbicides by different types of organic matter and a bentonite clay. *Weed Res.*, **9,** 20-26.

GAILLARDON, P., 1975. Etude des phénomènes de sorption entre deux triazines herbicides et des acides humiques. *Weed Res.*, **15,** 321-327.

GAILLARDON P., CALVET R., TERCÉ M., 1977. Adsorption et désorption de la terbutryne par une montmorillonite Ca et des acides humiques seuls ou en mélanges. *Weed Res.*, **17,** 41-48.

HANCE R. J., 1965. The adsorption of urea and some of its derivatives by a variety of soils. *Weed Res.*, **5,** 98-107.

HANCE R. J., 1969. Influence of pH, exchangeable cation and the presence of organic matter on the adsorption of some herbicides by montmorillonite. *Can. J. Soil Sci.*, **49,** 357-364.

JAMET P., PIEDALLU M. A., 1975. Etude de l'adsorption et de la désorption de la pyrazone par différents types de sols. *Weed Res.*, **15,** 113-121.

KHAN S. U., MAZURKEWICH R., 1974. Adsorption of linuron on humic acid. *Soil Sci.*, **118,** 339-343.

LIU L. C., CIBES-VIADE H. et KOO E. K. S., 1970. Adsorption of ametryne and diuron by soils. *Weeds*, **18,** 470-474.

MANGENOT F. in DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970. *Ecologie microbienne du sol* ; p. 298-302 ; Masson et Cie, éd., 120 Bld St-Germain, Paris VIe.

MONNIER G., STENGEL P., BODET J. M., 1976. Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. ITCF. *Simplification du travail du sol en production céréalière*, 7 et 8 décembre 1976, Paris, 151-165.

MOREALE A., A. GALLEZ, R. van BLADEL, 1977. Influence de la matière organique et de la teneur en eau du sol sur les phénomènes de sorption de l'aniline. *Weed Res.*, **17,** 349-356.

OSGERBY J. M., 1973. Processes affecting herbicide action in soil. *Pestic. Sci.*, **4,** 247-258.

SULLIVAN J. D., FELBECK, GEORGE T. Jr, 1968. A study of the interaction of s-triazine herbicides with humic acids from three different soils. *Soil Sci.*, **106,** 42-52.

TALBERT R. E., FLETCHALL O. H., 1965. The adsorption of some s-triazines in soils. *Weeds*, **13,** 46-52.

WALKER A., CRAWFORD D. V., 1968. The role of organic matter in adsorption of the triazine herbicides by soils. In *Isotopes and radiation in soil organic matter studies*. Proceeding of a symposium, Vienna, July 1968. International Atomic Energy Agency, Vienna, 91-105.

WEBER J. B., WEED S. B., WARD T. M., 1969. Adsorption of s-triazines by soil organic matter. *Weeds*, **17,** 417-421.

Ann. agron., 1978, **29** (3), 257-276.

Etude d'un procédé d'épuration par compostage préalable au cours de la fabrication de pâte a papier (1)

J. RIVIÈRE

avec la collaboration technique de Régine PEDERGNANA
Laboratoire de Microbiologie
Institut National Agronomique Paris-Grignon
9, *rue de l'Arbalète*, 75231 *Paris Cedex* 05

Résumé

Cette étude a porté sur un procédé d'épuration par compostage préalable de copeaux de bois (Feuillus) traités par la soude. Après une durée de 30 j, les copeaux mis en tas de 1,50 m de haut, sont envahis par une population bactérienne élevée (de l'ordre de 10^{10} bactéries revivifiables par g).

Après extraction aqueuse des substances polluantes, on mesure la diminution de la DCO et de la DBO_5 au cours du compostage, diminution qui atteint à la fin 50 p. 100 et 80 p. 100 respectivement. L'action d'un apport d'azote et de phosphore ainsi que celle d'un retournement ont été étudiées. La liqueur noire obtenue à la fin du compostage est susceptible d'être biodégradée en aérobiose dans un fermenteur, avec une diminution de 40,6 p. 100 de la DCO et de 62,2 p. 100 de la DBO_5 après 48 h d'incubation à 30 °C.

Les souches bactériennes responsables ont été dénombrées et identifiées. Une forte proportion d'entre elles appartiennent au genre *Arthrobacter* qui paraît adapté à ces milieux très alcalins. Quelques propriétés des souches responsables de cette épuration ont été étudiées (sources de carbone utilisables, production et utilisation d'acides organiques).

I. — Introduction

Cette étude a été réalisée dans une usine utilisant un traitement par la soude de copeaux de Feuillus en vue d'obtenir une pâte chimique.

Le traitement des copeaux par la soude dans un lessiveur (ou cuiseur) solubilise les lignines, divers polyosides (hémicelluloses) et permet de récupérer à la sortie des presses les fibres de cellulose constituant la pâte à papier.

Les liqueurs noires qui représentent la plus grande partie des eaux résiduaires de ce procédé de fabrication (qui peut se faire à froid ou à chaud suivant les cas) ont été beaucoup moins étudiées que les lessives bisulfitiques résiduaires de papeterie. On sait qu'elles contiennent des acides alcools dont certains, dénommés sacchari-

(1) Ce travail a fait l'objet d'une Convention de Recherches passée entre l'ADEPRINA et les Papeteries de l'Epte (Jean-Claude Hervé et Compagnie). Il a été déposé sous le n° 7227382 (2.194.201) en tant que brevet concernant un procédé de fabrication de pâte à papier.

niques, représentent une fraction importante de la dégradation alcaline des polyosides du bois (Monzie-Guillemet *et al.*, 1964 ; Monzie-Guillemet et Monzie, 1966).

Elles contiennent également des lignines partiellement dégradées, de couleur foncée, solubles dans les alcalis, appelés alcalilignines, dont la composition est mal connue (Kaiser, 1977). Ces liqueurs noires sont très polluantes, mais elles peuvent être épurées par divers traitements biologiques : lagunage (Singh, 1975), disques rotatifs (Lee et Mueller, 1975), lits bactériens ou boues activées (Chen *et al.*, 1974). Ces traitements sont toujours onéreux (Marchand, 1971 ; Amberg, 1974 ; Melzer *et al.*, 1975), et nécessitent beaucoup d'eau pour avoir une faible concentration de polluants (Kollatsch, 1977).

L'épandage de ces liqueurs noires demande des terrains d'une grande surface puisqu'il faut obtenir une assez faible teneur en alcalilignine pour éviter de polluer la nappe phréatique (Kaiser, 1977).

L'idée de réaliser un compostage des copeaux après cuisson à la soude a résulté d'une observation fortuite. En effet, lorsque les presses, pour une raison quelconque, ne pouvaient pas traiter tous les copeaux sortant du cuiseur, ces derniers étaient mis en tas avant d'être réintroduits dans le circuit de fabrication.

Un de ces tas étant resté ainsi à l'écart pendant plusieurs semaines, on y observa une élévation de température à l'intérieur, puis la disparition progressive de la coloration noire des copeaux imprégnés de soude. Un examen microscopique y révéla un très grand nombre de bactéries rendues ainsi responsables du dégagement de chaleur, d'où l'idée d'utiliser un tel processus de compostage afin de réaliser une épuration préalable. Des bactéries avaient déjà été rendues responsables d'un dégagement de chaleur dans des copeaux de bois de papeterie (non traités par la soude) stockés en tas (Jacquiot et Lapetite, 1967).

Le premier tas observé ayant une hauteur de 1,50 m, l'expérimentation mise en œuvre fut réalisée dans les mêmes conditions.

II. — Matériel et méthodes

1. — *Réalisation de l'expérimentation*

1.1. — *Compostage des copeaux.*

Des copeaux de bois d'origine diverse (Feuillus) propres à la production de pâte à papier sont mis au contact d'une solution aqueuse de soude caustique (80 g/l), à une température comprise entre 24 et 27,5 °C, jusqu'à ce que la quantité de soude absorbée atteigne environ 4 à 5 p. 100 du poids du bois. Cette opération appelée cuisson s'effectue dans deux appareils successifs, un mélangeur puis un cuiseur.

La composition chimique du bois a été étudiée notamment par Vilars (1962), Rydholm (1965) et Wenzl (1970). Quelques résultats sont résumés dans les tableaux 1 et 2.

Après égouttage, ces copeaux représentant une masse de 25 t, sont mis en tas de 1,50 m de hauteur. Le liquide égoutté (liqueur noire de cuisson) est recyclé, étant réintroduit dans le cuiseur pour traiter une nouvelle quantité de copeaux frais.

L'expérimentation a été conduite en réalisant deux séries de deux tas, la première

TABLEAU 1

Composition chimique du bois de quelques espèces
(Vilars J., 1962 ; Wenzl H. F., 1970)
Composition of wood from various origin

Espèce	Cendres en p. 100	Protéines en p. 100	Galactanes en p. 100	Mannanes en p. 100	Arabanes en p. 100	Xylanes en p. 100	Cellulose en p. 100	Hémicelluloses en p. 100	Lignine en p. 100
Pin (*Pinus sylvestris*)	0,4	1,2	1,4	7,6	0,6	7,2	44,0	26	29,0
Bouleau (*Betula verrucosa*)	0,3	2,5	0,6	0,5	0,5	24,6	40,0	39	21,0
Hêtre (*Fagus grandifolia*)	0,4	1,1	1,2	2,1	0,5	17,5	42,1	—	22,1
Peuplier (*Populus tremuloides*)	0,2	0,8	0,8	2,3	0,4	16,0	53,3	—	16,3

TABLEAU 2

Composition des cendres du bois de diverses essences
(Rydholm S. A., 1965)

Composition of ashes from various wood
(Norway's pine : heart-wood, sap-wood, bark ; Birch)

Espèce	Composition des cendres en p. 100									
	$Na_2O + K_2O$	CaO	MgO	MnO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	P_2O_5	CO_2
Pin sylvestre :										
cœur	13,0	39,3	10,8	5,4	3,0	—	1,8	—	0,4	21,9
aubier	16,9	34,6	6,8	4,8	2,8	2,7	2,4	5,0	3,9	19,5
écorce	9,5	49,8	6,8	2,8	1,0	10,7	1,9	2,8	6,0	7,5
Bouleau	18,6	30,8	10,3	3,5	0,9	3,4	2,0	3,9	5,1	21,3

série sans apport de sels minéraux, la seconde série avec apport d'azote (sous forme de nitrate de sodium) et de phosphore (sous forme de phosphate disodique) dont les quantités ont été calculées d'après la formule : $DBO_5/N/P = 100/5/1$ appliquée aux liqueurs de cuisson obtenues après pressurage d'une partie aliquote. Cet apport a été fait sur des copeaux déjà macérés depuis 13 jours.

Dans un volume d'un mètre cube, il y a 480 kg de copeaux humides, donnant, après pressurage, 285 l d'une liqueur noire ayant une DBO_5 totale égale à 2 850 000 mg. En effet, la liqueur noire de cuisson a, en moyenne, une DCO de l'ordre de 16 000 mg/l et une DBO_5 de l'ordre de 10 000 mg/l. Il faut donc ajouter 142,5 g d'azote et 28,5 g de phosphore, soit environ 850 g de nitrate de sodium et 130 g de phosphate disodique par m^3 de copeaux dans les deux tas de la seconde série.

Dans chaque série, un des deux tas est retourné quand la température (mesurée à l'aide d'une canne pyrométrique) au centre du tas atteint 55 °C.

1.2. — *Epuration aérobie de la liqueur noire.*

Il s'agit d'une liqueur noire obtenue à la sortie des presses, après un compostage préalable de 30 jours, dont l'épuration aérobie a été réalisée dans un fermenteur (Bioflo, NEW BRUNSWICK) après deux heures de décantation.

On a effectué plusieurs essais en faisant varier la durée (48 h et 5 jours) et l'apport ou non, de sels minéraux (azote et phosphore). Ces derniers sont fournis dans les proportions définies comme suit, sans tenir compte des traces éventuelles présentes dans la liqueur noire dont a mesuré la demande biochimique en oxygène (AFNOR, 1969) : $DBO_5/N/P = 100/5/1$ et $100/5/2$.

2. — *Préparation des échantillons*

On a fait trois sortes de prélèvements :

— à 100 cm de hauteur, au centre du tas,
— à 50 cm de hauteur, en surface du tas,
— à 50 cm de hauteur, au centre du tas.

Les échantillons sont alors traités de la manière suivante :

— 10 g de copeaux sont broyés pendant 10 mn (VIRTIS 45) dans 90 ml de diluant (sérum physiologique additionné de Bacto-tryptone à 1 g/l) ;

— le mélange homogénéisé est ensuite dilué jusqu'à 10^{-9}.

3. — *Etude bactériologique*

3.1. — *Dénombrement des bactéries revivifiables.*

Les techniques et les milieux sont résumés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Dénombrement et isolement des souches
Media for isolation and counting bacteria

Type de microorganismes	Milieux	Références
Microflore totale aérobie (Total count aerobic)	Gélose nutritive pH 7,2 (Nutrient agar)	Tryptone Glucose Yeast Agar. BD Mérieux Réf. : 5.1831
Microflore totale anaérobie (Total count anaerobic)	Gélose nutritive additionnée de 0,5 g/l de chlorhydrate de cystéine pH 7,2 pH 10,5	Tryptone Glucose Yeast Agar. BD Mérieux Réf. : 5.1831
	Gélose nutritive à l'azoture de sodium (3 g/l) (Nutrient agar with 0,5 g p. liter cysteine-nutrient agar with 3 g p. liter sodium azide)	Raibaud *et al.* (1966)
Microflore adaptée aérobie (Specific aerobic flora)	Gélose à l'extrait de copeaux * (250 g/l) pH 8,5 pH 10,5 répartie en plaques (Shaving wood extract agar pH 8,5 and pH 10,5)	
Microflore adaptée anaérobie (Specific anaerobic flora)	Gélose à l'extrait de copeaux * (250 g/l) pH 8,5 pH 10,5 répartie en tubes profonds (Shaving wood extract agar pH 8,5 and pH 10,5)	

* L'extrait de copeaux est obtenu après filtration d'un mélange d'eau distillée (2 l) et de copeaux imprégnés de soude (1 kg) ayant subi 20 mn d'autoclavage à 120 °C.

(Shaving wood extract is obtained after filtration of a mixture (H_2O 2 l, plus soda permeated shaving wood 1 kg) that undergoes autoclaving for 20 mn at 120 °C).

Les dénombrements sont effectués après 8 jours d'incubation à 30 °C, 40 °C, et 55 °C.

3.2. — *Isolement, identification et caractérisation des souches.*

Les souches sont purifiées après passage sur tubes de gélose nutritive inclinée à pH 7,2 et à pH 10,5 (après addition de soude).

L'identification des souches a été faite d'après les caractères donnés dans la 8e édition du Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (Buchanan et Gibbons, 1974). Les épreuves utilisées pour caractériser les souches ont déjà été décrites (Rivière et Gatellier, 1974).

4. — *Mesures de la pollution*

On a mesuré, à l'aide des méthodes normalisées (AFNOR, 1969), la demande biochimique en oxygène (DBO_5), la demande chimique en oxygène (DCO), et les matières en suspension (MES).

Ces mesures ont été effectuées sur la liqueur noire résultant d'une cuisson habituelle et sur la liqueur noire obtenue après compostage dont on a ensuite étudié l'épuration biologique aérobie dans un fermenteur.

En ce qui concerne les copeaux soumis au compostage, on détermine, en fonction de la durée de compostage, la pollution présente à chaque instant après une extraction aqueuse. A cet effet, on prélève une quantité de copeaux telle qu'il y ait 100 ml d'humidité (ce qui correspond à environ 170 g de copeaux). Ces copeaux sont ensuite broyés dans 900 ml d'eau distillée (désintégrateur L'HOMARGY), puis filtrés sur papier, et les mesures sont réalisées avec le filtrat clair obtenu.

III. — Résultats et discussion

Les résultats obtenus au cours d'une expérimentation portant seulement sur 2 années doivent être interprétés avec prudence.

Ils peuvent être regroupés dans quatre parties distinctes concernant la diminution de la pollution lors du compostage des copeaux, l'épuration biologique aérobie en fermenteur d'une liqueur noire obtenue en fin de compostage, l'étude bactériologique du compostage, et les propriétés des bactéries responsables du compostage et de l'épuration biologique aérobie de la liqueur noire.

1. — *Diminution de la pollution lors du compostage des copeaux*

Pour apprécier l'efficacité de l'épuration lors du compostage, on a mis au point une méthode simplifiée d'extraction aqueuse des substances polluantes (après désintégration mécanique des copeaux suivie d'une filtration). Le dosage de la DBO_5 et de la DCO du filtrat obtenu en fonction de la durée et des conditions de compostage permet de suivre la dynamique du processus d'épuration.

On note que la valeur moyenne est de l'ordre de 2 000 mg/l pour la DCO et 1 000 mg/l pour la DBO_5 après 4 jours de compostage (fig. 1). Ces valeurs qui correspondent à un pressurage de copeaux dilué au 1/10 sont du même ordre de grandeur que celles des liqueurs noires de cuisson dans le cas de la DBO_5, un peu plus élevées pour la DCO (les liqueurs noires de cuisson ont, en effet, une DBO_5 d'environ 10 000 mg/l et une DCO voisine de 16 000 mg/l).

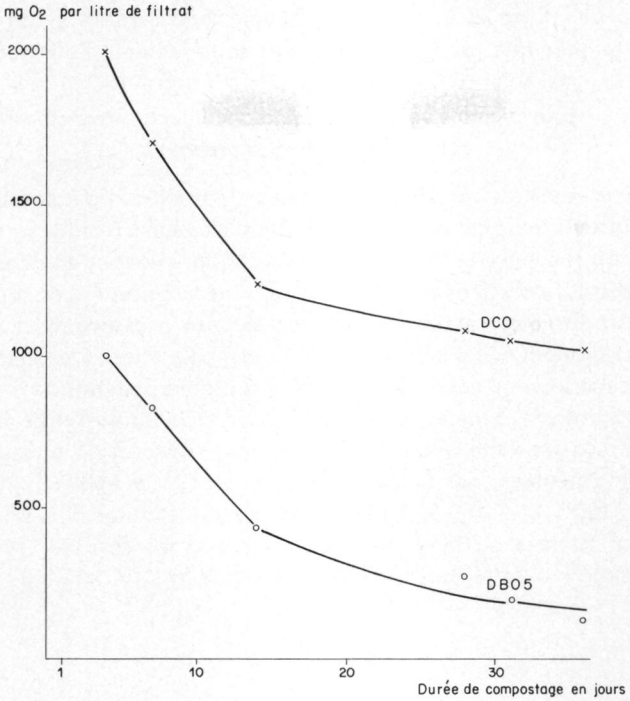


FIG. 1. — *Evolution de la pollution au cours du compostage d'un tas de copeaux* (1,50 m) *sans apport d'azote et de phosphore. On a mesuré la DCO et la* DBO_5 *du filtrat après une extraction aqueuse correspondant à une dilution* 1/10.

Variation of the pollution during composting of a pile of wood shaving (1,50 m) *without addition of nitrogen and phosphorus. Determinations of COD et* BOD_5 *were made on the filtrate after aqueous extraction* (dilution 1/10).

Deux expérimentations ont été faites, sans apport et avec apport d'azote et de phosphore, en respectant les proportions $DBO_5/N/P = 100/5/1$ de la liqueur noire initiale avant compostage. Après 4 jours de compostage, sans apport d'azote et de phosphore, les valeurs mesurées sur l'extrait aqueux de copeaux après filtration sont les suivantes :

$$DCO = 2\,000 \text{ mg/l}$$
$$DBO_5 = 1\,000 \text{ mg/l}.$$

L'évolution de ces valeurs au cours du compostage est représentée dans la figure 1. On note que la DCO est réduite de 46 p. 100 après 28 jours et de 50 p. 100 après 36 jours, alors que la DBO_5 est réduite de 73,8 p. 100 en 28 jours et de 86,9 p. 100 en 36 jours. Un apport d'azote et de phosphore n'améliore pas les performances (après 28 jours, on observe une réduction de 52,7 p. 100 de la DCO et de 72,2 p. 100 de la DBO_5).

Il n'est pas possible, avec ces résultats, de déterminer le pourcentage de la pollution de la liqueur noire réellement épuré. En effet, la première mesure a été faite après déjà 4 jours de compostage, et les dosages ont été effectués sur un extrait

aqueux de copeaux filtré et non sur une liqueur noire obtenue après pressurage. On peut donc estimer que les résultats obtenus sous-estiment l'efficacité du procédé.

2. — *Epuration biologique aérobie d'une liqueur noire obtenue après compostage des copeaux*

Ces premiers résultats ont conduit à modifier le procédé de fabrication de l'usine. A la sortie du cuiseur (le traitement à la soude étant effectué à froid pour ne pas détruire la microflore), on récupère les liqueurs de cuisson après égouttage des copeaux. Ces liqueurs sont aussitôt recyclées et réintroduites dans le cuiseur. Les copeaux égouttés sont mis en tas pour être compostés. Ensuite, lors du pressurage, il reste en fin de fabrication, une liqueur noire dont il faut assurer l'épuration. Des essais d'épuration biologique de cette liqueur noire décantée au préalable pendant deux heures ont été effectués au laboratoire dans un petit fermenteur (1 l, Bioflo NEW BRUNSWICK).

L'expérience a été faite avec et sans apport d'azote et de phosphore, dont les quantités sont calculées en fonction de la DBO_5 préalablement déterminée ($DBO_5/N/P = 100/5/1$ et $100/5/2$). Après 48 h d'incubation à 30 °C, l'aération et l'agitation étant réglées au maximum, on a obtenu les résultats résumés dans le tableau 4. On note que la plus grande diminution de la DCO (51,8 p. 100) et celle de

TABLEAU 4

Diminution de la DBO_5 et de la DCO après 48 h à 30 °C de fermentation aérobie de la liqueur noire avec et sans apport d'azote et de phosphore (fermenteur Bioflo, NEW-BRUNSWICK)

Decrease of BOD and COD of the black liquor after aerobic fermentation for 48 h at 30 °C with and without addition of nitrogen and phosphorus

$DBO_5/N/P$	Diminution de la DCO initiale (11 000) en p. 100	Diminution de la DBO_5 initiale (4 200) en p. 100	Nombre de bactéries revivifiables par ml
Sans apport .	40,6	62,2	6×10^8
100/5/1	46,2	81,7	$1,6 \times 10^9$
100/5/2	51,8	91,5	1×10^{10}

la DBO_5 (91,5 p. 100) sont atteintes quand il y a apport d'azote et de phosphore dans les rapports $DBO_5/N/P = 100/5/2$. Les propriétés des boues recueillies après 48 h et 5 j d'incubation à 30 °C sont résumées dans le tableau 5. On note qu'elles sont presque totalement biodégradées après 48 h d'aération, puisque le rapport DCO/DBO_5 est élevé (6,37).

Un essai réalisé en continu a permis d'obtenir des résultats comparables avec un faible taux de dilution ($D = 0,04\ h^{-1}$). Bien que l'on n'ait pas déterminé les conditions optimales de cette fermentation aérobie, ces premiers résultats sont encourageants et conduisent à penser que les eaux résiduaires obtenues sont susceptibles d'être biodégradées par un simple procédé d'épuration aérobie moins onéreux que ceux appliqués aux liqueurs noires habituelles.

TABLEAU 5

Propriété des boues obtenues (2 h de décantation)
après 48 *h et* 5 *jours de fermentation aérobie de la liqueur noire*
à 30 °C (fermenteur Bioflo, NEW-BRUNSWICK)
L'azote et le phosphore sont ajoutés suivant le rapport $DBO_5/N/P = 100/5/2$

Description of sludges obtained (2 h decanting) *after* 2 *or* 5 *days of aerobic fermentation of black liquor*
(N and P added at ratio $BOD/N/P = 100/5/2$)

	Mesures effectuées	Incubation à 30 °C	
		48 h	5 jours
Fermenteur	Poids des boues mg/l	1 102	1 656
	MES dans l'effluent après 2 h de décantation	408	347
	Volume après 30 mn de décantation (en p. 100 du liquide homogénéisé)	2,9	5,0
Boues	DCO mg/l	22 300	21 200
	DBO_5 mg/l	3 500	3 200
	Rapport DCO/DBO_5	6,37	6,63
	Poids de boues formées en kg par kg DBO_5 éliminé	0,27	0,39

3. — *Etude bactériologique du compostage des copeaux*

Cette étude a été faite avec des tas de trop petites dimensions (1,50 m de hauteur) pour pouvoir être utilisés à l'échelle industrielle.

Les valeurs des températures atteintes au cours du compostage dans trois zones du tas ont été relevées dans la figure 2. Dans les trois zones, la température la plus élevée a été mesurée entre le 10e et le 14e jour, mais les valeurs diffèrent suivant les zones, passant de 36 °C à la surface, à 56 °C dans le haut du tas. Ensuite la température reste stationnaire pendant quelques jours, puis s'abaisse lentement.

Pour dénombrer les bactéries revivifiables, on a utilisé divers milieux et diverses conditions de culture (tabl. 3). On a mis en évidence (fig. 3) la présence d'un très grand nombre de bactéries revivifiables (10^9 à 10^{10} par g de copeaux frais), mésophiles (croissance à 30 °C, mais pas à 55 °C), aérobies strictes, adaptées au milieu (dénombrement élevé dans un milieu à l'extrait de copeaux à pH 8,5 et 10,5), propriété déjà citée (Marchand, 1971 ; Kaiser, 1977). En effet, en anaérobiose, il y a beaucoup moins de colonies, ces dernières n'étant jamais anaérobies strictes. Si la température d'incubation atteint 40 °C, les dénombrements obtenus sont plus faibles. On comprend pourquoi le premier retournement (fig. 5 et 7) détermine une nouvelle prolifération

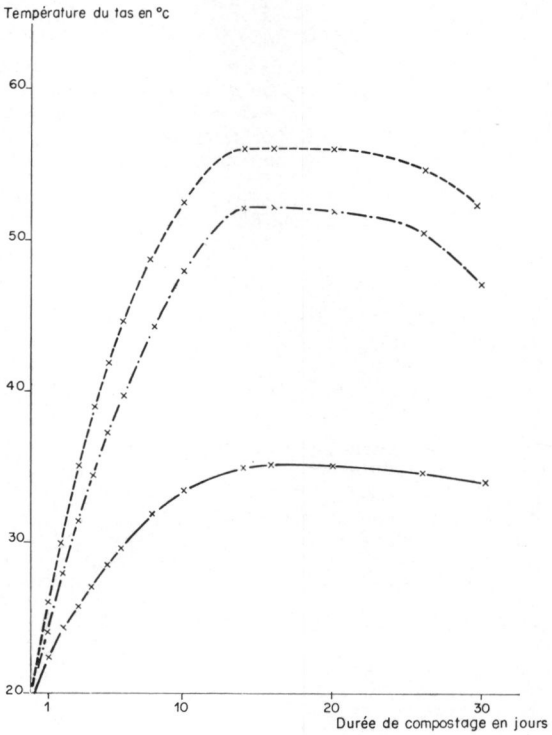


FIG. 2. — *Evolution de la température au cours du compostage d'un tas de copeaux* (1,50 m) *sans apport d'azote et de phosphore. On a mesuré la température dans trois zones de prélèvement.*

—·—·— 100 cm de hauteur, centre du tas

——— 50 cm de hauteur, surface du tas

– – – – 50 cm de hauteur, centre du tas

Variation of the temperature during composting of a pile of wood shaving (1,50 m) *without addition of nitrogen and phosphorus. Determination of temperature was made in three areas of the pile.*

bactérienne, favorisant l'aération à l'intérieur, et abaissant la température au centre du tas. Ces bactéries croissent tout au long du compostage, les dénombrements les plus élevés étant obtenus au bout de 53 jours (fig. 4). C'est généralement en surface que l'on dénombre le moins de bactéries viables (fig. 4, 5, 7). L'azote et le phosphore présents dans le bois (tabl. 1 et 2) sont presque en quantité suffisante pour assurer la prolifération des bactéries au cours du compostage, un apport supplémentaire ne donnant pas d'amélioration importante (fig. 6 et 7). Le dénombrement le plus élevé est atteint avec $2{,}5 \times 10^{10}$ bactéries revivifiables par g de copeaux en poids frais après 32 jours de compostage dans un prélèvement fait à 100 cm de hauteur, au centre du tas (fig. 7). Les liqueurs noires obtenues après le compostage sont plus facilement biodégradées après avoir été enrichies en azote et en phosphore (tabl. 4), ce qui s'explique aisément, puisque les bactéries du compostage ont déjà épuisé un milieu naturellement pauvre (Lyr *et al.*, 1967).

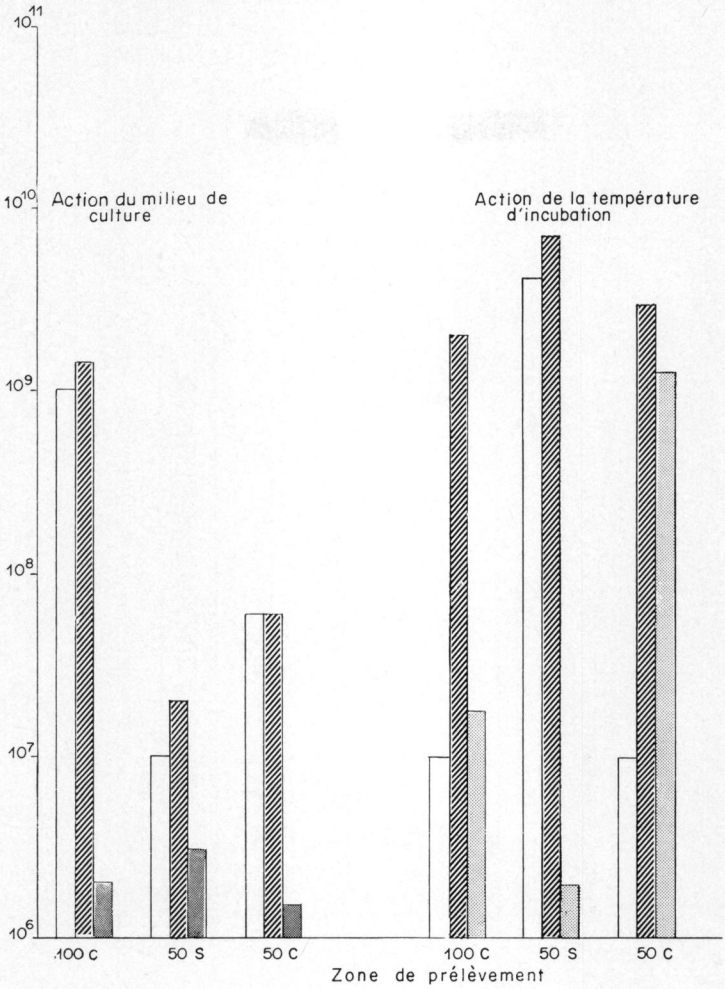


FIG. 3. — *Dénombrements bactériens dans un tas de copeaux* (1,50 m) *sans apport d'azote et de phosphore après* 18 *j de compostage en fonction des conditions de culture* (composition du milieu, température d'incubation, potentiel d'oxydoréduction) *et de la zone du prélèvement.*

100 C = à 100 cm de hauteur, au centre du tas
50 S = à 50 cm de hauteur, en surface du tas
50 C = à 50 cm de hauteur, au centre du tas

gélose nutritive, aérobiose, 30 °C
extrait de copeaux, aérobiose, 30 °C
extrait de copeaux, aérobiose, 40 °C
extrait de copeaux, anaérobiose, 30 °C.

Bacterial counts in a pile of wood shaving (1,50 m) *without addition of nitrogen and phosphorus after* 18 *days according to the function of various factors* (composition of culture medium, temperature, Eh, areas of the pile).

100 C = 100 cm high, in the middle.
50 S = 50 cm high, outside.
50 C = 50 cm high, in the middle.

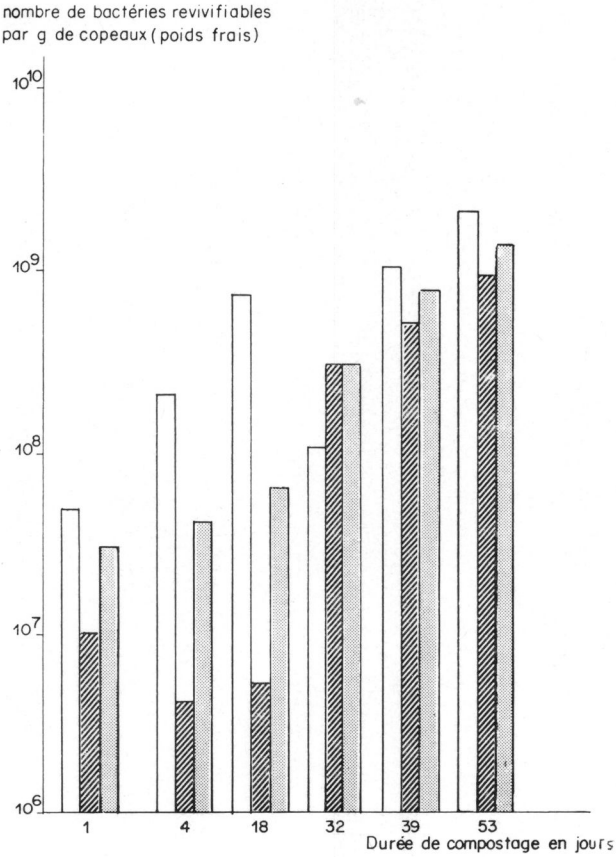


FIG. 4. — *Dénombrements bactériens dans un tas de copeaux* (1,50 m) *sans apport d'azote et de phosphore et sans retournement en fonction de la durée de compostage et de la zone du prélèvement* (les dénombrements ont été effectués dans un milieu gélosé à l'extrait de copeaux, à pH 8,5, incubé en aérobiose, à 30 °C.

100 cm de hauteur, centre du tas

50 cm de hauteur, surface du tas

50 cm de hauteur, centre du tas.

Bacterial counts in a pile of wood shaving (1,50 m) *without addition of nitrogen and phosphorus and without turning over according to the function of time and areas chosen* (counts were made in wood shaving extract agar medium, pH 8,5, aerobic conditions, 30 °C).

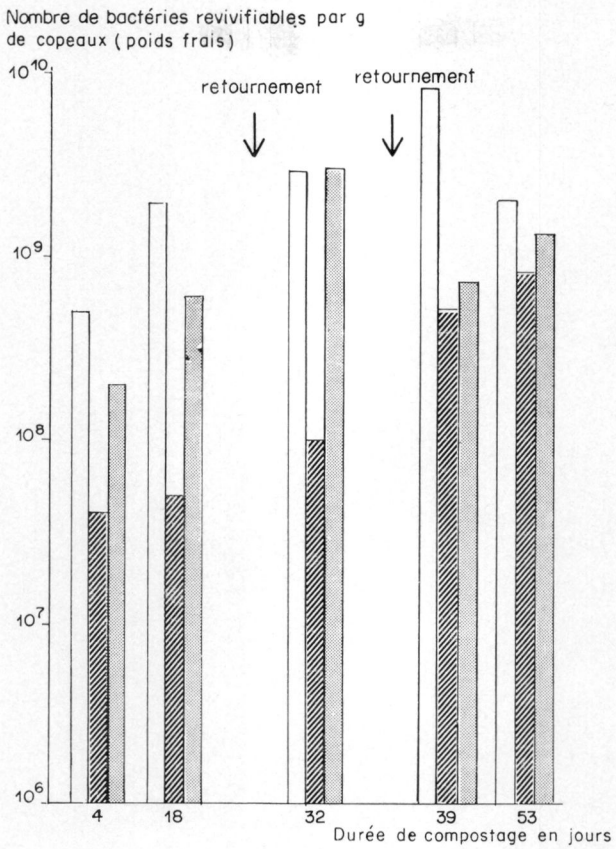


FIG. 5. — *Influence du retournement sur les dénombrements bactériens dans un tas de copeaux* (1,50 m) *sans apport d'azote et de phosphore en fonction de la durée de compostage et de la zone de prélèvement* (les dénombrements ont été effectués dans un milieu gélosé à l'extrait de copeaux, à pH 8,5, incubé en aérobiose, à 30 °C).

100 cm de hauteur, centre du tas

50 cm de hauteur, surface du tas

50 cm de hauteur, centre du tas.

Influence of the turning over on bacterial counts in a pile of wood shaving (1,50 m) *without addition of nitrogen and phosphorus according to the function of time and areas chosen* (counts were made in wood shaving extract agar medium, pH 8,5, aerobic conditions, 30 °C).

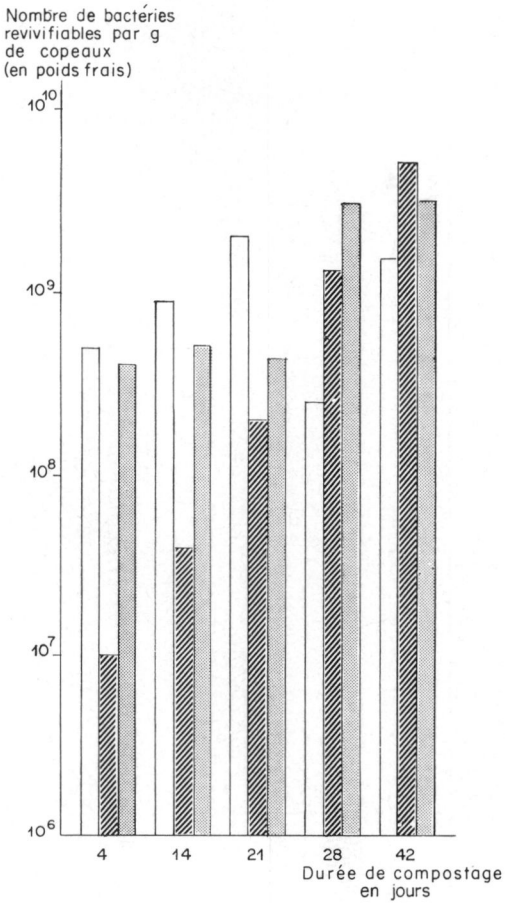


FIG. 6. — *Dénombrements bactériens dans un tas de copeaux* (1,50 m) *avec apport d'azote et de phosphore* (DBO_5/N/P = 100/5/1) *en fonction de la durée de compostage et de la zone de prélèvement* (les dénombrements ont été effectués dans un milieu gélosé à l'extrait de copeaux, à pH 8,5, incubé en aérobiose, à 30 °C).

100 cm de hauteur, centre du tas

50 cm de hauteur, surface du tas

50 cm de hauteur, centre du tas.

Bacterial counts in a pile of wood shaving (1,50 m) *with addition of nitrogen and phosphorus* (BDO/N/P = 100/5/1) *according to the function of time and aeras chosen* (counts were made in wood shaving extract agar medium, pH 8,5, aerobic conditions, 30 °C).

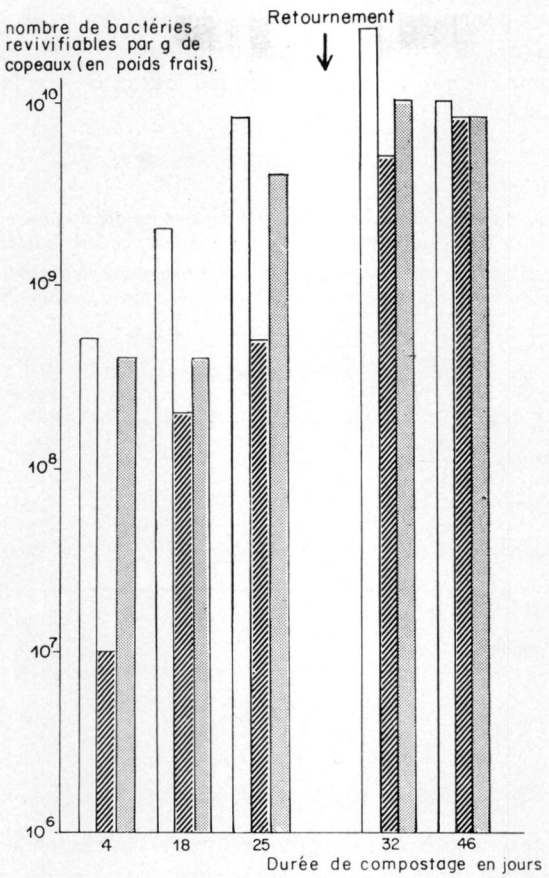


FIG. 7. — *Influence du retournement sur les dénombrements bactériens dans un tas de copeaux* (1,50 m) *avec apport d'azote et de phosphore* ($DBO_5/N/P = 100/5/1$) *en fonction de la durée de compostage et de la zone de prélèvement* (les dénombrements ont été effectués dans un milieu gélosé à l'extrait de copeaux, à pH 8,5, incubé en aérobiose, à 30 °C).

100 cm de hauteur, centre du tas

50 cm de hauteur surface du tas

50 cm de hauteur, centre du tas.

Influence of the turning over on bacterial counts in a pile of wood shaving (1,50 m) *with addition of nitrogen and phosphorus* ($BDO/N/P = 100/5/1$) *according to the function of time and areas chosen* (counts were made in wood shaving extract agar medium, pH 8,5, aerobic conditions, 30 °C).

4. — *Propriétés des bactéries responsables du compostage des copeaux et de l'épuration biologique aérobie d'une liqueur noire en fin de compostage*

La répartition en genres des souches isolées dans les deux cas est différente, mais il apparaît que le genre *Arthrobacter* est typique de ces deux biotopes (tabl. 6). Sauf dans le cas d'un compostage de longue durée (60 jours), on n'a jamais retrouvé de bactéries cellulolytiques.

TABLEAU 6

Répartition en pourcentage des genres bactériens isolés dans un tas de copeaux mis en compostage (1,50 m avec apport d'azote et de phosphore sans retournement) *et dans la liqueur noire fermentée*

Percentage of distribution of bacterial genera in a pile of shaving wood composted (1,50 m with addition of nitrogen and phosphorus without turning over) *and in a fermented black liquor*

Coloration de Gram	Groupe morphologique	Genre identifié	p. 100 de souches étudiées	
			copeaux	liqueur noire
Positive	Coques	*Micrococcus*	0	6,0
	Bâtonnets sporulés	*Bacillus*	24,0	6,0
	Bâtonnets polymorphes	*Arthrobacter*	66,0	59,0
Négative	Bâtonnets	*Aeromonas*	2,1	0
		Acinetobacter-Moraxella	4,5	29,0
		Pseudomonas	2,1	0
		Non identifiés	1,3	0

Les substances responsables de la pollution formées après traitement des copeaux par la soude proviennent probablement des hémicelluloses et de la lignine (tabl. 1). On a donc recherché quelles étaient les sources de carbone utilisées par les diverses souches isolées appartenant au genre *Arthrobacter* (tabl. 7) en tenant compte de la composition connue de quelques hémicelluloses (Ebringerova *et al.*, 1972 ; Stewart, 1969 ; Thompson et Heller, 1966).

Le glucose, le xylose, l'arabinose, le galactose, le tréhalose, le fructose, le glycérol, le mannitol et l'éthanol sont utilisés par au moins 50 p. 100 des souches. Celles provenant des copeaux produisent souvent des acides organiques à partir de ces diverses sources (tabl. 7). Des acides organiques servent également de source de carbone à de nombreuses souches du même genre, surtout parmi celles isolées de la liqueur noire fermentée en aérobiose (tabl. 8). Des phénols apparentés à la lignine sont également utilisés (tabl. 9).

Des observations analogues ont été faites avec les souches des genres *Acinetobacter-Moraxella* fréquemment isolées au cours de l'épuration aérobie d'une liqueur noire.

L'étude des propriétés de ces bactéries permet d'expliquer pourquoi le pH s'abaisse au cours du compostage (formation d'acides organiques, tabl. 7), puis se

TABLEAU 7

Utilisation des oses et des alcools comme source de carbone (A) *et production d'acides organiques* (B) *par les souches d'*Arthrobacter *isolées des copeaux* (C) *et de la liqueur noire fermentée* (F)

Oses and alcohols utilization as carbon source (A) *and organic production* (B) *by* Arthrobacter *strains isolated from composted shaving wood* (C) *and fermented black liquor* (F)

p. 100 des souches isolées	Glucose		Xylose		Arabinose		Lactose		Galactose	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
C	61	61	61	59	78	76	10	10	50	42
F	95	32	95	22	52	10	27	0	60	15
p. 100 des souches isolées	Mannose		Tréhalose		Rhamnose		Fructose		Saccharose	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
C	24	22	71	20	46	19	85	69	35	28
F	72	12	80	7	80	12	92	42	82	27
p. 100 des souches isolées	Sorbitol		Glycérol		Mannitol		Inositol		Ethanol	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
C	35	7	86	78	78	52	34	10	56	22
F	57	2	85	20	92	35	20	0	60	25

TABLEAU 8

*Utilisation des acides organiques comme source de carbone par les souches d'*Arthrobacter *isolées des copeaux* (C) *et de la liqueur noire fermentée* (F)

Organic acid utilization as carbon source by Arthrobacter *strains isolated from composted shaving wood* (C) *and fermented black liquor* (F)

p. 100 des souches isolées	Acétate	Formiate	Citrate	Succinate	Malonate	Pyruvate
C	62	10	18	59	42	30
F	100	15	67	85	25	95
p. 100 des souches isolées	Lactate	Malate	Glycolate	Benzoate	Hydroxybenzoate	
C	13	24	12	13	8	
F	45	85	15	12	30	

stabilise à une valeur voisine de 9 (utilisation d'acides organiques comme source de carbone, tabl. 8).

On peut noter que les souches identifiées au cours du compostage ou lors de la fermentation aérobie de la liqueur noire semblent distinctes de celles retrouvées dans les sols après infiltration des eaux résiduaires (Marchand, 1971).

TABLEAU 9

*Utilisation des phénols apparentés à la lignine comme source de carbone par les souches d'*Arthrobacter *isolées des copeaux* (C) *et de la liqueur noire fermentée* (F)

Utilization of phenolic compounds related to lignin as carbon source by Arthrobacter *strains isolated from composted shaving wood* (C) *and fermented black liquor* (F)

p. 100 des souches isolées	Acide vanillique	Vanilline	Acide férulique	Acide sinapique	Guaïacol
C	50	26	33	8	28
F	28	26	30	12	43

Ces premiers résultats intéressants ont conduit à augmenter la dimension des tas de copeaux. Dans le cas de tas de 3 m de haut, l'élévation de la température est plus rapide, les dénombrements bactériens du même ordre de grandeur, la répartition en genres très voisine. Par contre, un essai à l'échelle industrielle avec des tas de 9 m n'a pas été favorable, la température atteinte dépassant 80 °C et arrêtant précocement la croissance bactérienne, donc toute épuration préalable. Dans ces conditions, une succession de retournements ou un brassage régulier, tels qu'on les réalise dans le compostage des ordures ménagères, permettraient d'envisager une solution au problème qui n'a pas été résolu expérimentalement.

IV. — Conclusions

Au cours du compostage de copeaux traités par la soude, à froid, on observe une importante croissance bactérienne (10^9 à 10^{10} bactéries revivifiables par g de copeaux frais), réduisant la pollution avant fabrication (diminutions approximatives de 50 p. 100 de la DCO et de 80 p. 100 de la DBO_5).

Ces bactéries métabolisent en aérobiose les substances biodégradables provenant probablement de l'action de la soude sur la lignine et les hémicelluloses. La liqueur noire obtenue après le compostage semble pouvoir être assez facilement épurée par un processus biologique aérobie.

Avant de pouvoir affirmer qu'un tel système d'épuration préalable est réalisable à l'échelle industrielle, de nombreux essais sont encore nécessaires, mettant en œuvre des techniques utilisées dans le compostage des ordures ménagères. Il est évident, en effet, que les petits tas de 1,50 m de haut sans retournement ne sont pas utilisables économiquement par suite des énormes volumes de copeaux nécessaires à la production journalière d'une unité de fabrication de pâte à papier.

Reçu pour publication en janvier 1978.

Summary

Study of a purification system through a previous compost formation during pulp making process

This study concerned a purification system through a previous composting of wood chips (hardwood) treated with soda. After 30 days the chips placed in 1,50 m high heaps are overgrown with a dense bacterial population (about 10^{10} bacteria/g).

After an aqueous extraction of the pollution substances, the decrease of the COD and BOD_5 during compost formation is measured, a decrease which reaches respectively 50 and 80 p. 100 at the end. The effect of a nitrogen and phosphorus supply as well as that of a turning over are studied. The black liquor obtained at the end of compost formation is liable to be biodegraded under aerobic conditions in a fermentor with a decrease of 40,6 p. 100 in the COD and of 62,2 p. 100 in the BOD_5 after a 48 h incubation at 30 °C.

The bacterial strains responsible for the process were counted and identified. A high percentage of them belongs to the Arhrobacter genus which seems to be well-adapted to these very alkaline media. Some characteristics of the strains responsible for this purification were studied (available carbon sources, production and utilization of the organic acids).

Zusammenfassung

Untersuchung eines Reinigungs verfahrens durch vorherige Kompostierung wahrend der Papierbreierzeugung

Diese Untersuchung betraf ein Reinigungsverfahren durch vorherige Kompostierung von Natronbehandelten Holzspänen (Laubbaüme). Nach 30 Tagen sind die in 1,50 m hohen Haufen gesetzten Späne durch eine dichte Bakterienmikroflora (ungefähr 10^{10} wiederbelebungsfähige Bakterien pro g) überwuchert.

Nach wässeriger Extraktion der Verschmutzungsstoffe wird die Abnahme des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und des biologischen Sauerstoffbedarfs (BSB_5) während der Kompostierung gemessen, eine Abnahme, die am Ende 50 p. 100 bzw. 80 p. 100 erreicht. Die Wirkung einer Stickstoff-und Phosphorgabe wie auch die eines Umwendens werden untersucht. Die nach der Kompostierung erhaltene schwarze Flüssigkeit kann an der Luft einer aeroben biologisch degradietg werden in einer Gärungsküpe mit einer Abnahme von 40,6 p. 100 des CSB und 62,2 p. 100 des BSB_5 nach einer 48 Stunden Inkubation bei 30 °C.

Die dafür verantwortlichen Bakterienstämme wurden gezählt und erkannt. Ein grosser Teil davon gehört der Sattung Arthobacter an, die sich dieser sehr alkalischen Umgebung anzupassen scheint. Enige Eigenschaften der für diese Reinigung verantwortlichen Stämme sind untersucht worden (verwertbare Kohlenstoffquellen, Erzeugung und Verwendung der organischen Saüren.

РЕЗЮМЕ

Изучение метода очистки при помощи предварительного компостирования, во время приготовления бумажной массы.

Ж. РИВЬЕР.

Изучался метод очистки с помощью предварительного компостирования древесных стружек (лиственные), обработанных содой. По истечении 30-ти дней, стружки, сложенные в кучки высотой в 1 м 50 заселялись крупными популяциями бактерий (приблизительно 10^{10} способных к возрождению бактерий на гр).

После водной экстракции загрязняющих веществ, измерялось уменьшение DCO и DBO_5 в течении компостирования, уменьшение, достигавшее к концу эксперимента соответственно 50-ти и 80-ти процентов. Изучалось также действие внесения азота и переворачивания. Черную жидкость, полученную в конце компостирования, можно под вергнуть биодеградации, в аэробных условиях в ферментаторе, с уменьшением DCO на 40,6 р. 100 и DBO_5-на 62,2 р. 100, после 48-ми часовой инкубации, при температуре в 30 °Ц.

Найденные штаммы бактерий были перечислены и распознаны. Большая часть из них принадлежала к роду Аятяновастея, кажется хорошо приспособленному к таким, очень щелочным средам. Изучались также и некоторые свойства штаммов ответственных за эту очистку (источники углерода пригодные для использования, продукция и применения органических кислот).

Références bibliographiques

AFNOR, 1969. *Détermination de la demande chimique en oxygène* (DCO) T 90 101. *Détermination de la demande biochimique en oxygène* (DBO) T 90 103. AFNOR Ed., 92 Courbevoie.

AMBERG H. R., 1974. The economic impact of the Federal Water Pollution Control Act amendments on the pulp and paper industry. *Tappi*, **57**, 62-66.

BUCHANAN R. E., GIBBONS N. E., 1974. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 8e éd., Williams and Wilkins Cy., Baltimore.

CHEN H. T., FREDRICKSON E. E., CORMACK J. F., YOUNG S. R., 1974. Four biological systems for treating integrated paper mill effluent. *Tappi*, **57,** 111-115.

EBRINGEROVA A., DRAMAR A., DOMANSKY R., 1972., Glucomannan from the wood of *Carpinus betulus*. *Holzforschung*, **26,** 89-97.

JACQUIOT C., LAPETITE D., 1967. Recherches sur le rôle des bactéries dans la conservation des copeaux de bois de papeterie stockés en tas. *C. R. Acad. agri.*, **53,** 899-901.

KAISER P., 1977. Sur l'épuration par le sol d'eaux résiduaires chargées en alcalilignine. *Ann. agron.*, **28,** 291-312.

KOLLATSCH R., 1977. Effluent treatment in the paper industry. *Industrie abwasser*, 27-28.

LEE E. G. H., MUELLER J. C., 1975. Rotating biological disk treatment of kraft mill effluents. *Water Poll. Control*, **113,** 25-29.

LYR H., POLSTER H., FIELDER H. J., 1967. *Gehölz Physiologie*. Veb Gustav Fischer Verlag, Iena, 92-124.

MARCHAND M., 1971. *L'épuration biologique des eaux résiduaires de papeterie par infiltration dans le sol : modalités, biodégradation des alcalilignines*. Thèse Univ. Bordeaux I, n° 330.

MELZER A., RENAUX M., TENIERE-BUCHOT P. F., 1975. Coûts d'investissement et de fonctionnement des stations d'épuration. *Cahiers techniques* n° 4, *Bulletin Seine-Normandie*, 11-24.

MONZIE-GUILLEMET D., RAOUX H., MONZIE P., 1964. Fractionnement et dosage des constituants organiques des liqueurs noires. *Actes Symp. Intern. Grenoble*, Imprimeries Réunies de Chambéry éd., 191-211.

MONZIE-GUILLEMET D., MONZIE P., 1966. Analyse de mélanges d'acides sacchariniques par chromatographie en phase gazeuse. *Tech. Rech. Papetières*, **8,** 74-79.

RAIBAUD P., DICKINSON A. B., SACQUET E., CHARLIER H., MOCQUOT G., 1966. La microflore du tube digestif du Rat. I. Techniques d'études et milieux de culture proposés. *Ann. Inst. Pasteur*, **110,** 568-590.

RIVIÈRE J., GATELLIER C., 1974. Ecologie des Corynébactéries isolées de parcelles traitées par des fumures prolongées. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **11,** 303-317.

RYDHOLM S. A., 1965. *Pulping Process*. Interscience Publishers, New York, 96-232.

SINGH R., 1975. Paper maker opens effluent treatment works. *Municipal engineering*, **152,** 1175.

STEWART C. M., 1969. The formation and chemical composition of hardwoods. *Appita*, Melbourne, **22,** 4-18.

VILARS J., 1962. *Aspects techniques de la fabrication des pâtes et du papier*. Leperche éd. Paris, p. 26.

THOMPSON N. S., HELLER H. H., 1966. Investigations on the isolation and carbohydrate composition of different components of trees and wood. *Pulp, Paper Mag. Can.*, **67,** 12-18.

WENZL H. F. J., 1970. *The chemical technology of wood*. Acad. Press, London.

Ann. agron., 1978, **29** (3), 277-310.

Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore

I. — Application de l'analyse factorielle des correspondances à l'analyse de la végétation

F. de MONTARD et L. GACHON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I.N.R.A.,
12, *avenue de l'Agriculture*
63100 Clermont-Ferrand

Résumé

Cette étude a pour objet une typologie agronomique de la végétation des pâturages des Monts Dore et son interprétation écologique.

Elle applique l'analyse factorielle des correspondances à l'analyse des données quantitatives de végétation et propose une méthode d'introduction des données du milieu pour faciliter l'interprétation écologique.

Sur un fond floristique commun à base d'*Agrostis tenuis*, *Meum athamanticum* et *Gentiana lutea*, on distingue différents faciès pastoraux très proches des catégories décrites par les phytosociologues et étroitement liés à l'activité du bétail, à l'altitude et à l'exposition générale des versants.

A. — Introduction

Les pâturages des Monts Dore (fig. 1) qui s'étendent au-dessus de la zone d'habitat permanent entre les altitudes de 1 100 et 1 800 m sont exploités exclusivement en pâture.

Ils représentent une production fourragère souvent supérieure à 2 ou 3 t de matière sèche par hectare et par an, disponible pendant 4 à 5 mois ; ils n'étaient utilisés en 1972 qu'à 60 p. 100 environ de leur capacité [1] sans doute en raison de la récente évolution de l'élevage des zones limitrophes vers une spécialisation laitière poussée : l'adoption de nouvelles races bovines moins rustiques et la diminution de la main-d'œuvre disponible pour l'estivage ont amené une profonde modification des systèmes de production.

D'après Durand (1946), à la fin de la dernière guerre, « les montagnes à lait

[1] Taux moyen du département du Puy de Dôme d'après CTGREF-SCEES 1976.

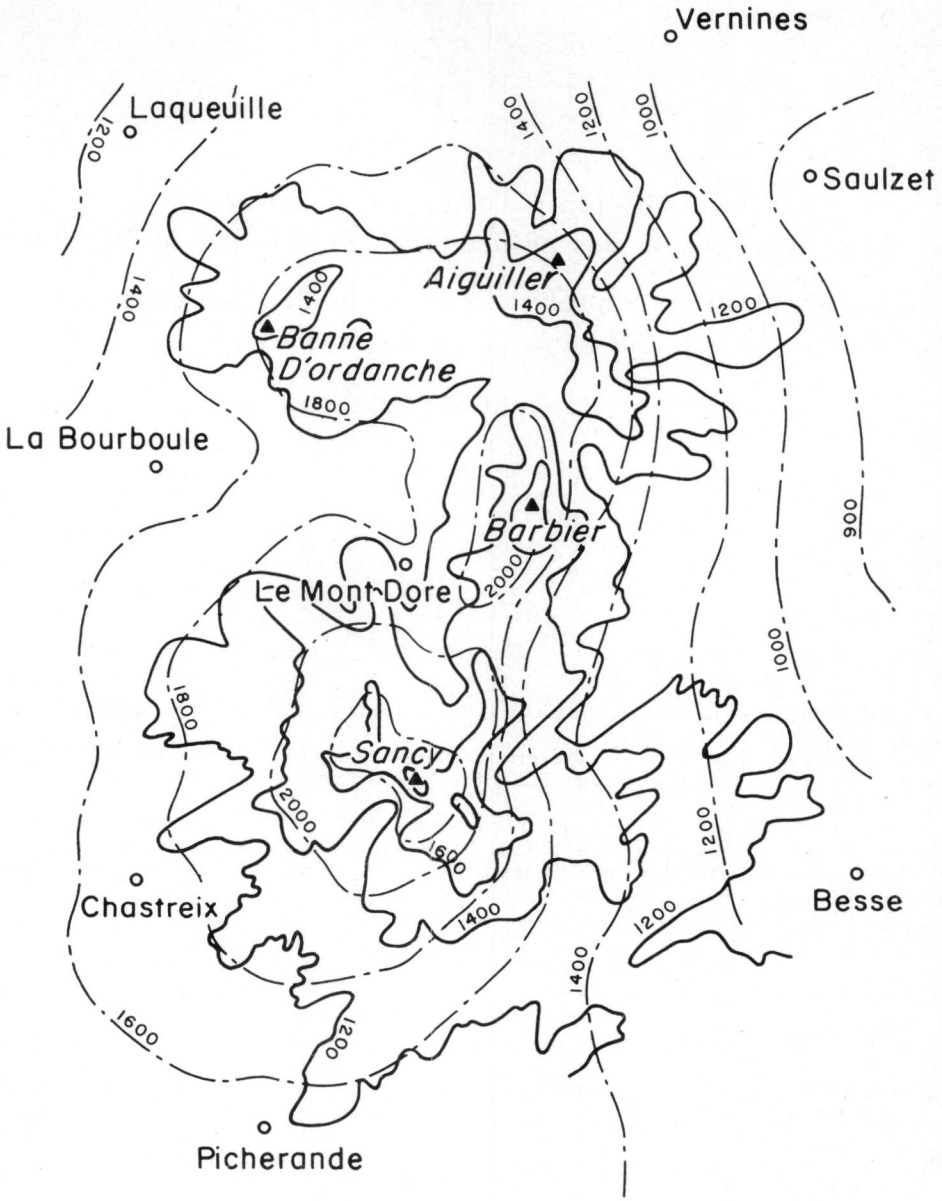


FIG. 1. — *Relief et pluviométrie annuelle dans les Monts Dore* (e = 1/200 000).

Courbes Isohyètes (mm)

Courbes de niveau (m)

Relief and rainfall in Monts Dore.

constituent la plus grande partie des pacages de montagne des Massifs volcaniques.. Dans les Dore, on compte qu'une vache fournit 3 quintaux de fromage (3 fois 50 kg) ; entre 900 et 1 000 m, un bon pacage peut entretenir par ha une vache et son veau ; à 1 250 et 1 300 m, il faut le double d'espace ». Ce système mixte produisant fromage et veaux « broutards », principalement en race Salers, est encore largement répandu dans le Cézallier et le Cantal sur les pâturages peu éloignés de la ferme ; dans les Monts Dore, ce cas se présente encore dans la région de Besse.

Mais, dans les années 1936 à 1946, le système des vacheries ne couvrait pas non plus l'ensemble du Massif :

« Dans les régions Nord (Tauves, Rochefort, St-Amand-Tallende) seules les génisses montent à la montagne... »

« Les montagnes pour génisses dominent dans certaines zones ; Plateau du Guéry, de l'Angle, montagne de Bozat, Banne d'Ordanche. »

Parfois la concentration des activités sur la production laitière intensive individuelle à la ferme a entraîné un net déclin de l'exploitation des pâturages notamment des pâturages communautaires (1) engendrant ainsi un processus de dégradation ; mais globalement les estives à génisses subsistent toujours dans le Nord et se sont étendues dans le reste du Massif aux dépens des vacheries.

En raison de l'évolution du prix des terres et de la pression de la clientèle à la recherche de bonnes estives qu'on observe dans les autres massifs volcaniques d'Auvergne, on peut penser que lorsque certains problèmes concernant le foncier, les techniques de récolte des fourrages et les bâtiments d'élevage seront résolus au niveau des exploitations de la périphérie des Dore, le regain d'intérêt, déjà sensible pour les pâturages du massif, se fera plus vigoureux. Les perspectives économiques et les connaissances agronomiques actuelles permettent d'envisager l'utilisation plus intensive des meilleurs pâturages, situés pour la plupart entre 1 100 et 1 300 m d'altitude, par des animaux relativement exigeants, jeunes bovins en croissance, génisses laitières notamment, vaches allaitant leur veau, et l'exploitation plus rationnelle des pâturages supérieurs par des animaux rustiques, moutons, chevaux, capables d'exploiter une végétation plus grossière.

Diverses méthodes peuvent être mises en œuvre pour améliorer le taux d'utilisation des surfaces pastorales :

1) l'association de plusieurs espèces animales pour diminuer les refus ;

2) la clôture qui permet la rotation d'un même troupeau sur des faciès de végétation pastorale de natures très différentes ;

3) une adaptation des systèmes de production animale permettant d'utiliser les ressources fourragères de l'estive en complément ou en parallèle aux ressources des pâturages situés plus bas, autour de la ferme d'hivernage du troupeau.

Les divers systèmes d'utilisation des estives ont des conséquences sur la productivité actuelle et sur sa perennité, en particulier sur les paramètres qui intéressent principalement l'agronome : les performances zootechniques par tête et par hectare, les niveaux de production et de consommation de l'herbe, la composition botanique des pelouses et les transformations subies par la végétation et par le sol.

---

(1) En 1972, 47 p. 100 de la surface des estives du Puy de Dôme sont en propriété communale ou sectionnale (CTGREF-SCEES 1976).

But de l'étude.

Pour promouvoir une meilleure utilisation agricole des estives, un programme de recherches a été mis en œuvre au Centre de Recherches de Clermont-Ferrand dans ces différents domaines. Le but de ce mémoire est de rendre compte des *connaissances* que nous avons pu acquérir dans les Monts Dore *sur la végétation pastorale, sa dynamique et sa productivité.*

La première partie est le résultat d'une enquête phyto-écologique menée dans les milieux les plus accessibles à une remise en valeur, c'est-à-dire, dans les pâturages sur sols profonds (de plus de 40 cm), naturellement sains et de pente inférieure à 40 p. 100.

Dans la deuxième partie, nous présentons l'inventaire cartographié de la végétation des pâturages des Monts Dore et nous tirons les conséquences de nos connaissances sur l'étendue actuelle, l'écologie et la productivité des différents faciès pour estimer la production et les possibilités d'amélioration.

B. — Position phytosociologique des pâturages inventoriés

L'étude phytosociologique des Monts Dore a été faite dès 1926 par Luquet dans son « esquisse phytogéographique » et reprise par Cusset et de La Chapelle (1961) dans leurs études botaniques (1).

Le dernier auteur a décrit les principales associations non sylvatiques c'est-à-dire un assez bon échantillon des formations de landes et de pâturages sur pente modérée qui nous intéressent ici ; la description et l'interprétation écologique que donne de La Chapelle de 7 des associations distinguées méritent d'être citées ; nous les résumons dans le tableau 1. D'après cet auteur, l'intensité d'exploitation, l'altitude et la position topographique apparaissent comme les facteurs les plus déterminants de la répartition de la végétation dans le domaine des sols profonds, drainés et de pente modérée que nous désirions étudier (2).

L'objectif de notre enquête était alors d'élargir le champ de vision à l'ensemble des Dore, comme l'avait fait Luquet dans sa carte phytogéographique en 1926, mais en appréhendant ces formations végétales du point de vue de l'animal consommateur, c'est-à-dire par l'étude de la composition botanique quantitative.

C. — Méthodes pour la typologie des pâturages

1) *Choix des données*

La méthode phytosociologique de Braun-Blanquet adoptée par de La Chapelle est une méhode semi-quantitative dans laquelle les espèces repérées dans un relevé de végétation sont affectées d'une note d'abondance-dominance comprise entre 0 (+) et 5 d'après une estimation visuelle globale. Une telle estimation ne peut donner une

---

(1) Voir aussi la carte des Groupements Végétaux de la Vallée de Chaudefour (Bock et Prelli, 1975).

(2) De l'altitude, de la pente et de l'exposition dépend aussi la répartition locale de l'enneignement, facteur très actif sur la végétation.

TABLEAU 1

Principales associations des sols drainés à pente modérée (d'après de La Chapelle, 1961)

Chief botanical associations in well drained soils with moderate slope

Etage	Association et altitude	Ecologie	Caractéristiques d'association	Alliance
Hetraie « Fagus sylvaticus » Stage	1 *Centaureo-Cynosuretum* 1 050-1 200 m	Pelouses bien pâturées souvent fumées	*Cynosurus cristatus, Trifolium repens, Centaurea nigra, Phleum pratense, Senecio Jacobaea.*	Cynosurion
	2 *Nardo-Leontodonetum pyr.* 1 050-1 200 m	Libre pacage du bétail ; extrême abondance du nard qui n'est pas brouté	*Nardus stricta, Leontodon pyrenaicus, Meum athamanticum, Selinum pyrenaeum, Galium saxatile.*	
Transition Intermediate stage	3 *Nardo-Festucetum rubrae* 1 200-1 400 m	Libre pacage ; abondance du nard ; comme ci-dessus	*Nardus stricta, Viola tricolor, Festuca rubra, Alchemilla vulgaris, Galium saxatile*	Nardo-Galion
	4 *Deschampsio-Gentianetum luteae* 1 200-1 500 m	Zones peu pâturées	*Deschampsia flexuosa, Dianthus sylvaticus, Gentiana lutea, Viola tricolor, Arnica montana, Agrostis tenuis Genista pilosa, Trifolium alpinum.*	Genisto-Vaccinion
Subalpin Supalpine stage	5 *Vaccinio-Gentianetum lutaeae* 1 500-1 800 m	Landes inexploitées ou peu exploitées	*Vaccinium myrtillus, Vac. uliginosum, Sorbus aucuparia, Gentiana lutea, Potentilla aurea, Arnica montana, Ligusticum mutellina.*	
		5*a* faciès à *Vac. myrtillus* en bas de pente et dans les petits ravins 6*b* faciès à *Vac. uliginosum* dans les stations plus ensoleillées		Genisto-Vaccinion
	6 *Calluno-Genistetum pilosae* 1 500-1 800 m	Landes inexploitées ou peu exploitées des crêtes déneigées par le vent, ensoleillées, sol érodé ;	*Calluna vulgaris, Genisto pilosa Cladonia rangiferina, Luzula spicata Cetraria cucullata.*	Genisto-Vaccinion
	7 *Nardo-Plantaginetum alpinae* 1 500-1 800 m	Combes à neige avec 7 à 8 mois d'enneigement	*Plantago alpina Leontodon pyrenaicus Meum athamanticum, Galium saxatile Trifolium alpinum, Selinum pyrenueum.*	Eu-Nardion

(1) Pour désigner les espèces, nous avons adopté la nomenclature de P. Fournier (1934-1940). Les noms d'auteurs figurent aux tableaux 3 et 4.

idée exacte de la composition botanique du fourrage offert à la pâture des animaux bien que, par ailleurs, le simple critère *présence-absence* des espèces soit suffisant pour la définition des associations végétales.

Pour notre part, nous avons préféré adopter comme critère quantitatif, la *fréquence absolue* F des espèces observées sur 25 points quadrats d'une même station (F variant de 0 à 25). Nous nous sommes inspirés ainsi de la méthode proposée par Daget et Poissonet (1971) pour l'analyse des végétations herbacées denses. Toutefois, nous avons maintenu un écart d'un mètre entre deux points quadrats de façon à estomper l'effet des microvariations et à minimiser les effets de contamination d'un point au suivant.

L'enquête s'est étendue sur l'ensemble des Monts Dore, mais nous avons restreint assez étroitement le domaine d'investigation par relevés botaniques aux pâturages proprement dits et aux végétations intermédiaires entre les formations herbacées et les landes montagnardes et subalpines. Nous nous donnions ainsi le moyen d'examiner de plus près *les termes de passage* entre certaines associations décrites par de La Chapelle, éventuellement d'en distinguer de nouvelles, et de rechercher une classification souple des pâturages adaptée aux objectifs agronomiques.

Les situations et les conditions de milieu inventoriées ont été : la position géographique dans le Massif, l'altitude, la pente, l'exposition, la distance du relevé au plus proche « buron » (1). Un échantillonnage de quatre-vingt-dix-huit relevés de végétation a été ainsi réalisé en faisant varier systématiquement les facteurs visibles et les types physionomiques de végétation, dans les limites que nous nous étions fixées (sols profonds, sains et de pente inférieure à 40 p. 100).

Trente-trois stations ont fait l'objet d'une enquête complémentaire en 1971 pour les critères caractérisant les horizons supérieurs du sol.

2) *Le traitement des données et son but* (2)

a) *Le but.*

La connaissance de la dynamique des peuplements pastoraux est indispensable pour orienter le choix des techniques d'exploitation capables d'engendrer l'amélioration agronomique ; pour atteindre cet objectif, le traitement des données doit permettre :

— *le classement des données floristiques* « en types de pâturage » ;

— *l'intégration des données écologiques à ce classement* pour en donner la signification dynamique.

Après consultation de R. Tomassone (Laboratoire de Biométrie, CNRZ, Jouy-en-Josas) l'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.) nous a semblé la méthode d'analyse la plus apte à donner une image générale des relations entre espèces sur laquelle nous avons essayé de bâtir une classification des pâturages et une hypothèse écologique concernant la dynamique de ces peuplements végétaux.

L'A.F.C. s'applique à des *ensembles en correspondance*. Or, l'ensemble des relevés

---

(1) Buron = terme local désignant la construction en dur abritant le berger et sa famille pendant l'estivage ; il comprend fréquemment une étable à veaux.

(2) Voir remerciements.

de végétations et l'ensemble des espèces qu'on y rencontre constituent une excellente figure de correspondance entre deux ensembles.

L'A.F.C. repose sur une propriété particulière de ce type de correspondance, que voici : il est possible de construire un « nuage » de points représentatifs des espèces et des relevés dans un espace à n + p dimensions (n espèces et p relevés) à partir de la définition d'une « proximité statistique » :

1) entre deux relevés en considérant les fréquences des espèces qui y sont inventoriées ;

2) entre deux espèces, en considérant leurs fréquences dans tous les relevés où elles sont présentes ;

3) entre une espèce et un relevé.

A chaque point du nuage correspond *une espèce* affectée d'une masse égale à la somme de ses fréquences dans tous les relevés, ou *un relevé* affecté d'une masse égale à la somme des fréquences des espèces qui y sont présentes (dans les deux cas, il s'agit des fréquences spécifiques variant de 0 à 25, que nous avons définies plus haut).

Dans un tel nuage de points, il est possible de déterminer les directions de plus grand allongement du « nuage », les « axes principaux », comme en analyse factorielle classique ; il est possible alors de projeter dans les plans de ces axes pris deux à deux, les points représentatifs des relevés et des espèces.

b) *Le déroulement du traitement.*

Plusieurs approches successives ont été nécessaires :

1) Une première analyse factorielle des correspondances des seules données botaniques (fréquence absolue des espèces) a permis de classer les relevés dans le plan de quatre axes principaux ; mais leur répartition dans ces plans, que nous ne présentons pas, est très irrégulière : deux relevés sont tout à fait isolés tandis que les quatre-vingt-seize autres forment un nuage dense et allongé dans un premier plan (axes 1 et 2). Dans le plan des axes 3 et 4, les 2 relevés précédents sont à la périphérie, 2 autres se détachent également d'un nuage central mal différencié.

Ces quatre relevés représentent des situations très particulières et comportent un cortège d'espèces qui leur sont propres :

— les deux premiers sont situés aux abords immédiats d'un « buron » et reçoivent en abondance le fumier et les résidus provenant de l'étable. Ils sont caractérisés par une grande abondance de *Lolium perenne*, *Phleum pratense*, *Poa trivialis*, accompagnées de *Chenopodium bonus-henricus* dans un cas, de *Festuca pratensis* et *Dactylis glomerata* dans l'autre ; toutes ces plantes sont absentes ou rares dans les autres relevés.

— Le troisième est siué dans une zone de repos de bovins, sur un sol profond à forte réserve en eau où domine *Deschampsia cespitosa* ; cette espèce à feuillage rude, vigoureux et à fort enracinement est très résistante au piétinement et à la dent des animaux et elle bénéfice sur cette station des fumures et d'un sol qui lui sont particulièrement favorables. C'est une situation exceptionnelle dans l'ensemble de notre enquête, très peu étendue en surface et donc sans grand intérêt pour les Monts Dore.

— Le quatrième est un relevé typique du *Vaccinio-gentianetum luteae* à forte dominante de *Vaccinium uliginosum* et *Vaccinium myrtillus*.

2) Une deuxième analyse excluant les deux premiers relevés précédents confirme

la singularité des troisième et quatrième relevés, tandis qu'un grand nombre de relevés forment encore un nuage trop dense dans le plan des deux premiers axes extraits.

3) Une troisième analyse excluant les quatre relevés cités aboutit à une dispersion excellente des quatre-vingt-quatorze relevés restants dans le plan des axes 1 et 2, imparfaite, mais suffisante pour notre interprétation, dans le plan des axes 3 et 4.

Les données caractérisant le milieu ont été exclues de l'analyse factorielle des correspondances proprement dite dans les trois cas précédents pour des raisons précises et impératives :

1) Les facteurs du milieu sont d'une nature fort différente des comptages botaniques ; on sait que l'A.F.C. est d'autant meilleure que le tableau des données est homogène.

2) La description des facteurs agissant sur la végétation a toutes chances d'être incomplète en un lieu donné, puisqu'elle implique des hypothèses de départ sur l'objet à observer et les mesures à effectuer. Elle exige aussi du temps et des moyens d'analyse et n'a pu être faite sur toutes les stations de l'inventaire botanique. Il nous a paru légitime de rechercher d'abord les relations entre espèces dans l'ensemble des stations et d'essayer ensuite d'en rendre compte par une analyse des facteurs du milieu dans un nombre limité de stations correspondant aux faciès pastoraux de la végétation.

3) Les déterminations concernant certains facteurs sont soumises à l'appréciation subjective de l'observateur, par contre l'enregistrement des données concernant la végétation peut être réglé selon un protocole précis et rendu pratiquement indépendant de lui.

Compte tenu des observations faites sur les 4 relevés précités dont l'interprétation écologique est claire, nous avons porté l'effort de classification et d'interprétation sur la troisième analyse intéressant quatre-vingt-quatorze relevés et quatre-vingt-onze espèces totales (on a rencontré de dix à quarante-trois espèces par relevé de vingt-cinq points quadrats, vingt-deux par relevé en moyenne).

D. — Résultats et interprétation de l'analyse des données de végétation.

1. — *Représentativité du système d'axes principaux*

Le programme d'A.F.C. utilisé (ordinateur de la Faculté des Sciences d'Orsay) permet d'extraire cinq axes principaux du nuage « relevés-espèces » issu de la mise en correspondance des deux ensembles « espèces » et « relevés ».

Rapportée à l'inertie totale du nuage, l'inertie absorbée par les axes extraits est de :

14,7 p. 100 pour l'axe 1,
7,6 p. 100 pour l'axe 2,
5,3 p. 100 pour l'axe 3,
5,2 p. 100 pour l'axe 4,
4,5 p. 100 pour l'axe 5.

Les cinq axes extraits par analyse du nuage rendent compte de 37,4 p. 100 de son inertie, et traduisent ainsi une part importante des variations de fréquence des espèces ; cela revient à constater que les espèces ont entre elles de fortes liaisons et que la

méthode de relevé permet, malgré son extrême simplicité de les exprimer pour les 2/5 environ.

Une partie seulement de l'inertie des espèces est absorbée par les axes. La part d'inertie d'une espèce absorbée sur un axe constitue la *contribution de l'espèce* sur cet axe ; elle peut être exprimée en valeur absolue : c'est la *contribution absolue*, ou en proportion de l'inertie totale de l'espèce : c'est la *contribution relative*.

Nous avons calculé la somme de ces contributions relatives pour les 5 axes et réparti les espèces dans les huit classes du tableau 2.

TABLEAU 2

Classe (Category)	Part d'inertie de l'espèce absorbée par les 5 axes p. 100 (Partial inertia of species totalizated on the five axis (p. 100))	Nombre d'espèces (Number of species)	p. 100 de l'inertie totale du nuage p. 100 of total inertia (Partial inertia of each class)
1	85 à 100	0	0
2	70 à 85	5	11,6
3	60 à 70	4	6,5
4	50 à 60	10	16,8
5	40 à 50	12	13,8
6	30 à 40	12	13,1
7	15 à 30	14	11,7
8	0 à 15	34	26,5
	0 à 100	91	100,0

Il est clair que l'analyse du comportement des trente-quatre espèces de la dernière classe nous échappe à peu près complètement dans l'espace de cinq dimensions de l'analyse. Pour que le comportement d'une espèce par rapport aux autres puisse être analysé dans ce système, il faut qu'elle ait une inertie totale et une contribution relative sur les cinq axes extraits suffisantes. La première condition exige un échantillonnage satisfaisant de relevés, la deuxième nécessite la prospection des relevés dans un domaine écologique suffisamment restreint pour que l'information recueillie puisse s'exprimer dans l'espace à cinq dimensions permis par le programme d'analyse et non dans un espace de dimensions plus élevées. Ces deux conditions sont contradictoires ; il faut accepter que notre ensemble de relevés, volontairement restreint à un domaine écologique limité, ne permette de décrire les relations qu'entre les espèces qui y sont bien représentées c'est-à-dire fréquemment rencontrées ; cette situation est la conséquence du choix que nous avons fait au départ de situer les relevés dans les types de végétation les plus largement représentés en surface ; ne s'agissant pas d'une enquête exhaustive, il est normal d'observer que le comportement d'un certain nombre d'espèces ne puisse pas être élucidé par l'analyse de notre ensemble de relevés.

Nous abordons ainsi le problème du choix des espèces discriminantes pour le classement des relevés.

2. — *Recherche des espèces discriminantes pour le classement des relevés*

Le programme utilisé donne les valeurs des contributions absolues des espèces sur les axes ; les espèces dont les contributions sont élevées sont celles qui contribuent

pour une part importante à l'inertie totale absorbée par chaque axe et, par conséquent, à l'extraction de ces axes ; le classement des relevés doit donc tenir compte principalement de ces espèces.

TABLEAU 3

Espèces dont la contribution absolue est supérieure à 50 sur un ou plusieurs des cinq axes extraits
Species of which the absolute contribution is more than 50 points on one or several extracted axis

	Axes						
	1	2	3	4	5		
Trifolium repens L.	670				70		
Deschampsia flexuosa (L.) Trin.	415		56				
Vaccinium myrtillus L.	219			329			
Briza media L.	62	290					
Nardus stricta L.	284	54	56	150	53		
Poa pratensis L.	256						
Avena pubescens Huds.	236	69	50				
Helianthemum num. (L.) Dunal	57	223	106				
Genistella sagittalis (L.) Gams.		222			100		
« *Festuca duriuscula* » Auct. non L.	113		205				
Potentilla tormentilla (L.) Necker	191						
Sanguisorba officinalis L.			190				
Rhinanthus minor Ehrh.		182	155		182		
Poa chaixii Vill.		186			173		
Achillea millefolium L.	174						
Ranunculus acer L.	149						
Succisa praemorsa (L.) Necker				84	142		
Danthonia decumbens (L.) D. C.				138			
Leontodon pyrenaicus Gouan	117						
Veronica chamaedrys L.	115						
Galium verum L.	113						
Festuca rubra L. (*F. nigrescens* Lam.)	106		55				
Stellaria graminea L.	106						
Thymus serpyllum L.	66	103	55				
Genista tinctoria L.		65			104		
Galium saxatile L.	102			74			
Carex caryophyllea Latour.	98						
Anthoxanthum odoratum L.		95	67				
Jasione montana L.				96			
Arnica montana L.				90			
Trifolium pratense L.	77	58					
Poa alpina L.				76			
Agrostis tenuis Sibth.		71					
Polygonum bistorta L.		67					
Plantago lanceolata L.	64						
Lotus uliginosus Schk.			74				
Vaccinium uliginosum L.				72			
Genista pilosa L.	67						
Phleum pratense L.	64						
Calluna vulgaris (L.) Hull			61				
Potentilla verna L.		57					
						Total des 5 axes	
Inertie exprimée	3 921	1 742	1 204	1 109	824	8 800	74 %
Inertie de l'axe	4 652	2 404	1 693	1 659	1 441	11 849	100
p. 100	84	72	71	67	63		
Nombre d'espèces assurant ce pourcentage	24	14	13	9	7		42

En considérant la liste des espèces rangées par ordre de contributions absolues décroissantes, nous appelons « espèces discriminantes » les « d » premières espèces dont la somme des contributions atteint ou dépasse une proportion donnée de la somme des contributions de toutes les espèces sur les axes principaux retenus.

Le choix de cette proportion présente évidemment un caractère arbitraire et doit dépendre en dernier ressort de la finesse de la classification qu'on désire atteindre. Dans le cas présent, nous avons retenu comme espèces discriminantes celles dont la contribution absolue sur un ou plusieurs axes dépasse cinquante ; avec un seuil moins élevé, le nombre d'espèces deviendrait tel qu'on répartirait les relevés entre un trop grand nombre de groupes pour un usage agronomique.

Les quarante-deux espèces retenues dans cette limite contribuent pour environ 75 p. 100 (74,2 p. 100 exactement) à l'inertie des quatre premiers axes extraits. Elles figurent dans le tableau 3.

Par ailleurs, certaines espèces, dont les contributions relatives sur les cinq axes extraits sont faibles, ont une inertie totale supérieure ou égale à la moyenne. Les unes sont présentes dans quelques relevés, d'autres au contraire dans un grand nombre. Même en pratiquant une nouvelle analyse après exclusion de quelques relevés à végétation particulière, l'ensemble de nos données exigerait plus de cinq axes pour exprimer les relations entre espèces. Le tableau 4 illustre ce phénomène.

L'inertie résiduelle de l'ensemble de ces neuf espèces représente 12,8 p. 100 de l'inertie totale du « nuage » ; elles ne doivent évidemment pas être laissées de côté pour l'ordination des relevés et le classement des pâturages.

TABLEAU 4

Espèces pouvant contribuer à la définition d'un ou plusieurs axes principaux supplémentaires

Species badly represented by the five extracted axis, for which definition of one or several new axis are needed

Espèces (Species)	Inertie totale (Total inertia)	p. 100 d'inertie absorbée par les 5 axes (Partial inertia on five axis)	Inertie résiduelle (Residual inertia)	Nombre de relevés (Quantity of botanical reports)
Euphrasia minima Jacquin ...	759	9	691	7
Lolium perenne L.	655	12	576	1
Brachypodium pinnatum (L.) P. B.	591	5	561	1
Deschampsia cespitosa L.	569	6	535	5
Lathyrus montanus (L.) Bernh.	419	4	402	12
Polygala vulgaris L.	374	7	348	3
Selinum pyraeneum (L.) Gouan.	367	12	323	32
Meum athamanticum Jacquin .	361	14	310	62
Dactylis glomerata L.	355	9	323	3
Les 9 espèces :				
inertie totale	4 450	9	4 069	
inertie moyenne.....	494	9	452	
Ensemble des 91 espèces				
inertie totale	31 657	37,4	19 808	94
inertie moyenne.....	348	37,4	217	

3. — *Recherche de la répartition des fréquences spécifiques dans les plans des axes extraits*

L'A.F.C. nous a permis de substituer à une répartition géographique complexe des espèces et des relevés, une répartition dans un espace à cinq dimensions dont on peut préciser la signification écologique (§ E).

Mais la position ponctuelle d'une espèce dans cet espace nouveau nous renseigne très imparfaitement sur le sous-espace qu'elle y occupe. Pour en préciser l'étendue, une démarche supplémentaire est nécessaire : *cette démarche consiste à substituer aux numéros indicatifs des relevés, les fréquences absolues de l'espèce dont on veut étudier la répartition.*

En pratique, on effectue les opérations suivantes, successivement dans le plan des axes 1 et 2 puis dans le plan des axes 3 et 4 :

1) une substitution : les numéros des relevés sont remplacés par la fréquence de l'espèce dont on veut étudier la répartition dans les plans considérés ;

2) tracé des limites de classes de fréquences dans les plans considérés ;

3) choix de la (ou des) limite(s) la (les) plus régulière(s) et report sur un graphe de synthèse où peuvent figurer les aires de répartition des fréquences de plusieurs espèces caractérisant des faciès distincts (§ 4).

Cette méthode permet une analyse fine des relations entre espèces et un contrôle étroit de la validité des groupes qu'on est amené à constituer.

On pourrait être tenté d'objecter à cette démarche le fait que les deux espaces qui sont figurés graphiquement à la sortie de l'ordinateur ne sont pas rigoureusement superposables : ainsi l'axe 1 et l'axe 2 dans le plan duquel sont figurés les relevés ne sont pas rigoureusement superposables respectivement aux axes 1′ et 2′ du plan dans lequel sont figurées les espèces : ce n'est pas un hasard si les sorties sont différentes pour les deux ensembles ; il existe un certain angle entre l'axe 1 et l'axe 1′ et de même pour les autres axes extraits ; cet angle est une fonction décroissante de l'inertie absorbée par le facteur considéré. En fait, en pratiquant la substitution entre le numéro d'un relevé et la fréquence dans ce relevé d'une espèce donnée, on reste dans un seul et même espace : celui où sont situés les relevés. La substitution est donc légitime et fiable.

4. — *Mise en évidence des relations entre espèces*

Le tracé des limites de fréquences spécifiques dans le plan représentatif des axes extraits pris deux à deux permet d'exprimer graphiquement les relations entre espèces :

Les aires (1) respectives de deux espèces peuvent être :

— entièrement disjointes { éloignées / ou juxtaposées }
— à recouvrement partiel (intersection)
— englobées l'une dans l'autre.

---

(1) Nota : Pour faciliter la lecture des figures, nous désignons l'aire comprise à l'intérieur d'une limite de fréquence spécifique par le nom de l'espèce suivie de la limite inscrite entre parenthèses.
Par exemple : l'aire sur laquelle *Deschampsia flexuosa* est présente avec une fréquence supérieure à 9 est désignée par « Deschampsia flexuosa (9) ».

Plusieurs espèces peuvent s'englober successivement et s'insérer en écailles.

Cette reprise des graphes de l'A.F.C. permet de faire apparaître clairement les relations entre espèces discriminantes des tableaux 3 et 4. L'examen de la répartition de toutes ces espèces dans le plan des axes 1 et 2 apporte déjà l'essentiel de l'information. La répartition dans le plan 3 × 4 et le long de l'axe 5 correspond à une analyse des groupes observés dans le plan 1 × 2 en les divisant et en les confirmant.

Nous avons pu ainsi représenter l'aire de répartition de la plupart des espèces du tableau 3, à l'exception de *Sanguisorba officinalis* et de *Lotus uliginosus* qui contribuent fortement à la définition de l'axe 3 de l'A.F.C. mais sont situées sur des sols peu représentés dans notre étude, c'est-à-dire sur des sols saturés d'eau de faible intérêt pastoral.

Quant aux espèces du tableau 4, on les range en deux catégories :

1) Celles qui correspondent à des stations particulières plus ou moins en marge de la gamme des pâturages qui nous intéressent ici en raison de leur faible extension.

Lolium perenne et *Dactylis glomerata* : pâturages très enrichis autour des « burons » et de très faible extension.

Brachypodium pinnatum : pâturages peu exploités situés sur pente forte exposée au sud à l'étage montagnard inférieur.

Deschampsia cespitosa : pâturages fortement piétinés et formés sur des sols mal drainés, assez fertiles (espèce mésotrophe).

2) Celles qui sont présentes d'une manière irrégulière dans les relevés mais dont pourtant l'aire de répartition correspond bien à celle d'autres espèces plus fidèles ; notre méthode de relevé à maille large et peu floristique a été ainsi mise en échec par le mode de répartition des cinq espèces suivantes :

Meum athamanticum, *Selinum pyraeneum*, *Lathyrus montanus et Polygala vulgaris* ; *Gentiana lutea* dont l'inertie totale (270) est inférieure à la moyenne malgré une présence constante dans le paysage, rentre dans cette catégorie.

Les groupes d'espèces et les relations qui existent entre eux apparaissent par comparaison des graphes 2 à 2. Sans entrer dans le commentaire exhaustif de cette démarche, nous l'illustrons par la présentation de cinq figures qui montrent la progression suivie :

— figures 1, 2, 3 et 4 : répartition des fréquences de quatre espèces et tracé de limites de fréquence dans le plan des axes 1 et 2 ;

— figure 5 : comparaison des plages de fréquence des espèces : *Avena pubescens*, *Nardus stricta*, *Deschampsia flexuosa* et *Poa Chaixii* ;

— figure 6 : situation relative des groupes déterminés après comparaison de l'ensemble des aires des espèces.

Le résultat de cette démarche, résumé dans la figure 5 et le tableau 5, aboutit à la définition de cinq groupes principaux que nous désignerons sous le nom de *faciès pastoraux* (pour les distinguer de la notion de faciès d'association végétale utilisée en phytosociologie) : Faciès 0, 1, 2, 3 et 4. Le faciès 5 à *Nardus stricta* et *Plantago alpina*, typique des combes à neige de l'étage subalpin a été ajouté pour le distinguer des nardaies anthropiques du faciès 2 (Luquet, 1926 et de La Chapelle, 1961).

Les coupures par classe ou par faciès ont forcément un caractère plus ou moins arbitraire car elles ne traduisent pas toujours une césure observable sur le terrain :

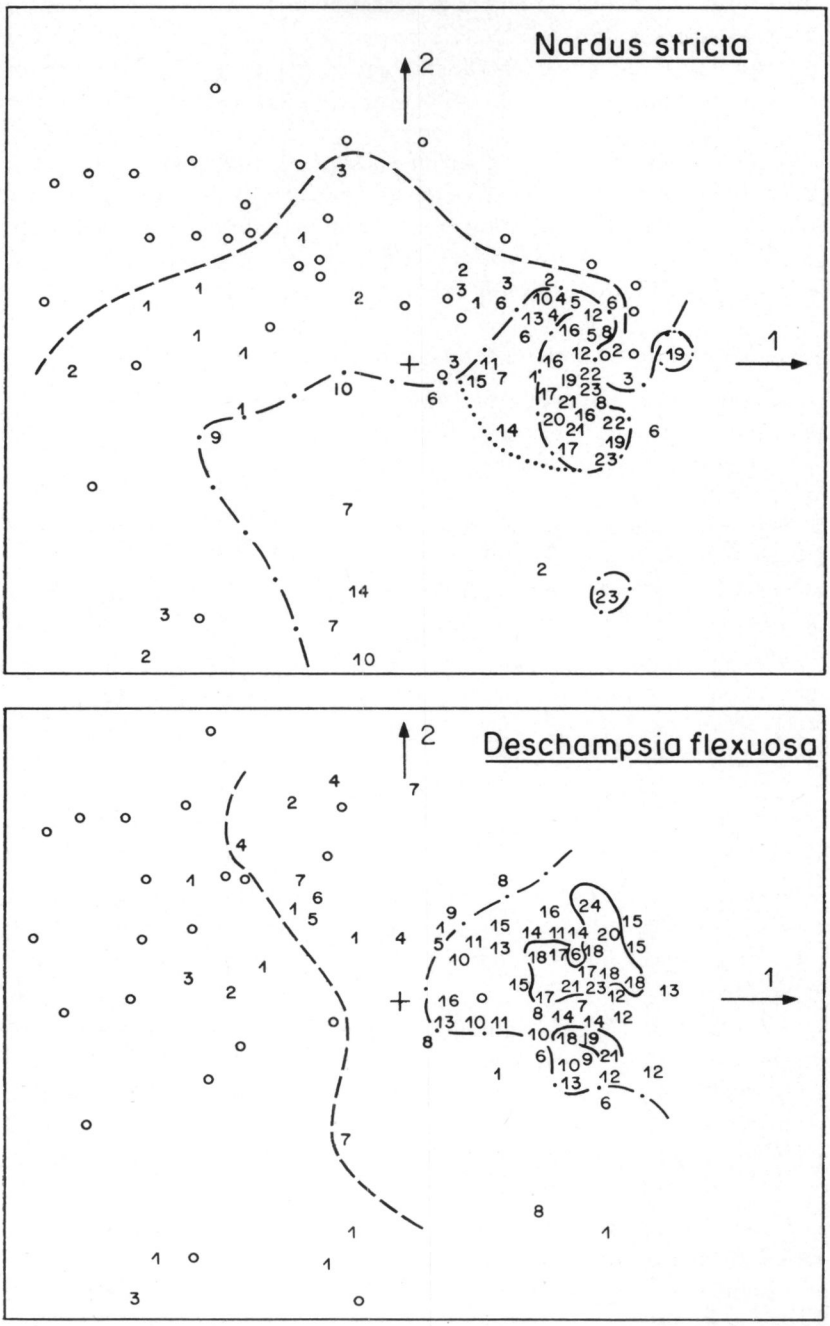


FIG. 2. — *Détermination des plages de fréquence dans le plan* 1 × 2 *de* Nardus Stricta *et* Deschampsia flexuosa.

Area of frequency of Nardus Stricta *and* Deschampsia flexuosa (Axis 1 and 2).

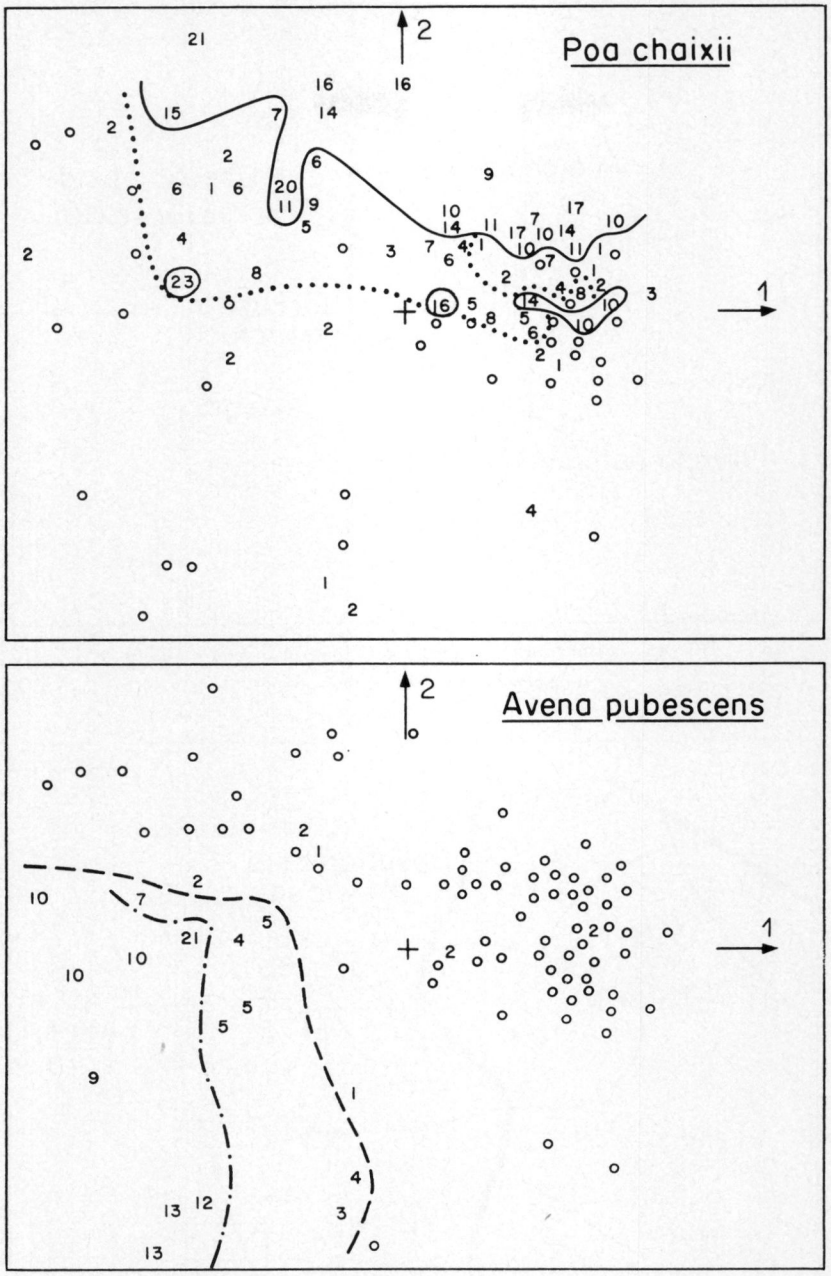


FIG. 3. — *Détermination des plages de fréquence dans le plan* 1 × 2 de Poa Chaixii *et* Avena pubescens.

Area of frequency of Poa Chaixii *and* Avena pubescens.

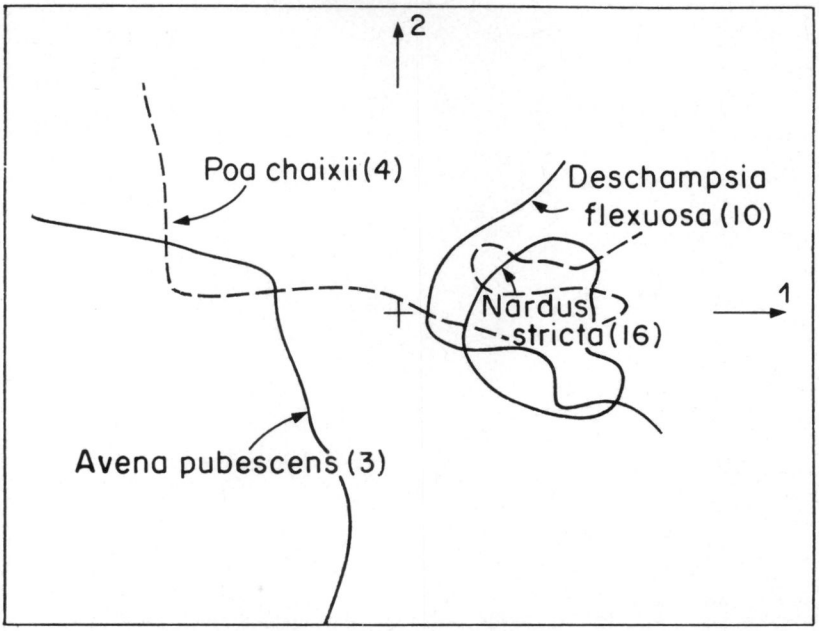


FIG. 4. — *Comparaison des plages de fréquence de quatre espèces.*
Comparison of areas of four species.

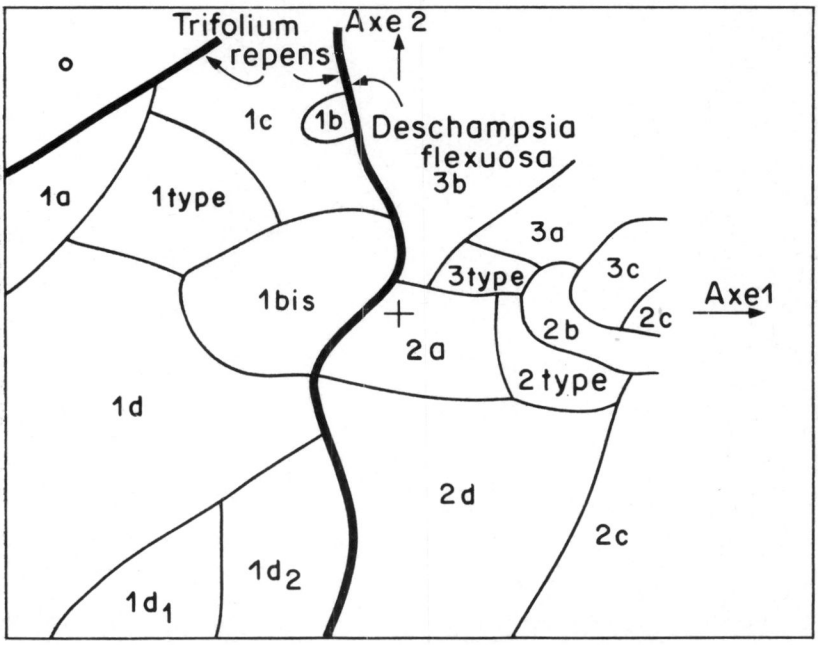


FIG. 5. — *Délimitation schématique des principaux faciès résultant de la comparaison des plages de fréquence.*
Scheme of distribution of chief faces in consequence of comparison of areas.

Parfois des discontinuités réelles existent entre deux végétations voisines ; parfois le passage de l'une à l'autre a lieu insensiblement. Nous nous efforcerons d'indiquer les termes de passage au cours de l'étude écologique.

5. — *Existence d'un fond prairial commun*

Les pâturages inventoriés sont des pâturages à *Agrostis tenuis*. Cette espèce présente, en effet, une fréquence remarquablement élevée dans la quasi-totalité de nos relevés.

Meum athamanticum, est présent dans soixante-deux relevés sur quatre-vingt-dix-huit, avec une fréquence très variable mais indépendante du type de végétation. C'est une plante liée au climat froid et humide (étage montagnard haut et subalpin) et aux terrains acides.

Gentiana lutea est aussi présente dans tous les secteurs inventoriés.

A partir de ce fond prairial commun, les végétations rencontrées dans notre inventaire (quatre-vingt-dix-huit relevés) se rattachent aux six faciès principaux décrits dans le tableau 5.

TABLEAU 5

Principaux faciès pastoraux des Monts Dore (1)
Chief types of pasture vegetations in Monts Dore

Faciès 0	POA TRIVIALIS, *Festuca pratensis, Ranunculus repens, Lolium perenne.*
Faciès 1	TRIFOLIUM REPENS, FESTUCA RUBRA, *Poa pratensis, Veronica chamaedrys, Ranunculus acris, Stellaria graminea, Achillea milefolium, Plantago lanceolata, Galium verum.*
1*a*	PHLEUM PRATENSE, CYNOSURUS CRISTATUS, *Dactylis glomerata, Trisetum flavescens, Alchemilla vulgaris.*
1*b*	DESCHAMPSIA CESPITOSA.
1*c*	POA CHAIXII, *Polygonum bistorta, Galium saxatile.*
1*d*	AVENA PUBESCENS, *Briza media, Trifolium pratense, Thymus serpyllum, Stachys officinalis, Chrysanthemum leucanthemum, Anthoxanthum odoratum.*
	$1d_1$ HELIANTHEMUM NUMMULARIUM, *Potentilla verna, Koeleria macrantha.*
	$1d_2$ *Rhinanthus minor, Genistalla sagittalis, Genista tinctoria.*
Faciès 1*bis*	FESTUCA RUBRA, *Selinum pyrenaeum, Lathyrus montanus,* (*Nardus stricta* sporadique).
Faciès 2	NARDUS STRICTA, *Potentilla Tormentilla, Carex caryophyllea, Anthoxanthum odoratum.*
2*a*	FESTUCA RUBRA, *Achillea millefolium, Ranunculus acris.*
2*b*	DESCHAMPSIA FLEXUOSA, « FESTUCA DURIUSCULA ».
2*c*	VACCINIUM MYRTILLUS, VACCINIUM ULIGINOSUM, GENISTA PILOSA, CALLUNA VULGARIS.
	Faciès particuliers, localement : — *Rhinanthus minor* 2*d*.
	— *Danthonia decumbens, Polygala vulgaris* 2*e*.
	— *Succisa praemorsa* 2*f*.
Faciès 3	DESCHAMPSIA FLEXUOSA, « FESTUCA DURIUSCULA », *Leontododon Pyrenaicus.*
3*a*	NARDUS STRICTA, *Potentilla Tormentilla, Carex caryophyllea.*
3*b*	POA CHAIXII, GALIUM SAXATILE, *Polygonum Bistorta.*
3*c*	CALLUNA VULGARIS, VACCINIUM MYRTILLUS, VACCINIUM ULIGINOSUM.
3*d*	*Poa alpina.*
Faciès 4	VACCINIUM MYRTILLUS, VACCINIUM ULIGINOSUM, *Genista pilosa,* CALLUNA VULGARIS.
Faciès 5	NARDUS STRICTA, PLANTAGO ALPINA.

(1) Trois espèces sont assez communes dans tous les faciès : AGROSTIS TENUIS, *Meum athamanticum* et *Gentiana lutea.*

E. — Introduction des données du milieu et interprétation écologique

L'analyse des données botaniques a permis de situer les relevés dans un espace à cinq dimensions dans lequel nous avons pu tracer les limites de fréquences des espèces les plus discriminantes.

La position des relevés étant connue dans ce système de relations entre espèces, il est possible de placer les valeurs d'une variable de situation ou de milieu dans cet espace en substituant au numéro des relevés les valeurs correspondantes de la variable.

Cette approche permet de rechercher la signification écologique des axes extraits par l'A. F. C. ou, au minimum, de faire ressortir les particularités du milieu dans les différentes zones de fréquence des espèces discriminantes que nous avons délimitées précédemment.

Il faut remarquer que la situation est différente selon le plan observé et notre analyse doit en tenir compte :

• Dans le plan des axes 1 et 2, tous les relevés présentent dans leur liste une ou plusieurs espèces discriminantes avec une fréquence importante. Il en résulte un excellent étalement des relevés dans le plan de ces deux axes ; leur position dans ce plan a une signification nette dans le réseau des relations entre espèces.

• Dans le plan des axes 3 et 4, seuls certains relevés (la moitié environ) ont une contribution notable et présentent dans leur liste une ou plusieurs espèces discriminantes et se trouvent ainsi bien répartis dans ce plan. Les autres relevés forment un nuage assez lâche autour de l'origine et n'ont qu'une faible contribution ; leur position ne peut donc fournir une indication valable pour rechercher la signification écologique de ces axes.

1. — *La répartition des variables de situation ou de milieu dans le plan des axes* 1 *et* 2

De nombreuses variables ont une répartition systématique dans le plan des axes 1 et 2 : la distance au buron, l'altitude, l'exposition et certains caractères du sol tels que la densité apparente, les teneurs en carbone et en azote, le rapport C/N, le pH, la teneur en sables, le rapport des cations échangeables $K^+/Ca^{++} + Mg^{++}$ (fig. 6 à 14).

a) *La fréquentation du bétail.*

L'influence de la fréquentation du bétail s'exprime par l'intermédiaire des paramètres « *Distance au buron* » et « *Altitude* » (fig. 6 et 7).

Le buron constitue le centre de rassemblement du troupeau pour la nuit et le point de départ et d'arrivée du parcours diurne.

La végétation est profondément influencée par ces mouvements du troupeau (Spatz, 1970) à tel point que le premier axe extrait dans notre analyse apparaît comme une expression de l'influence de la distance au buron.

D'une part, quatre classes de distance déterminent des zones assez nettement délimitées se succédant le long de l'axe 1. D'autre part, les centres représentatifs de chaque classe (barycentre des relevés appartenant à la classe considérée) sont presque alignés le long de cet axe.

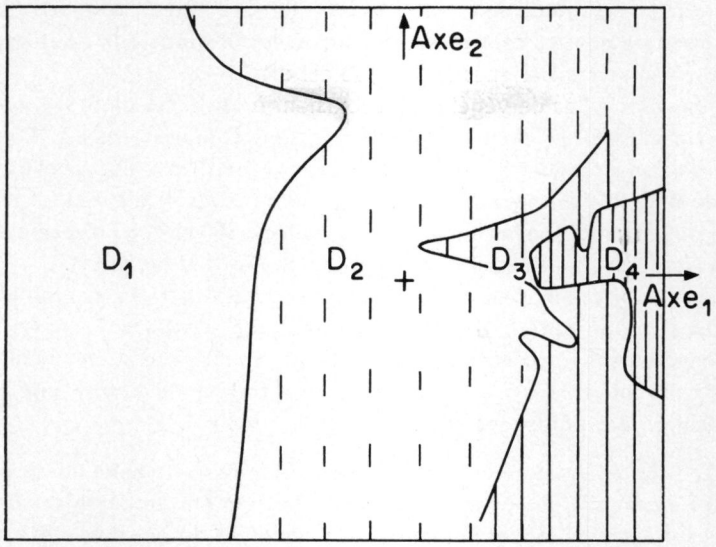


FIG. 6. — *Distance au buron.*

Distance from the summer house.

D_1 : de 30 à 300 m
D_2 : de 300 à 700 m
D_3 : de 700 à 1 300 m
D_4 : de 1 300 à 2 600 m.

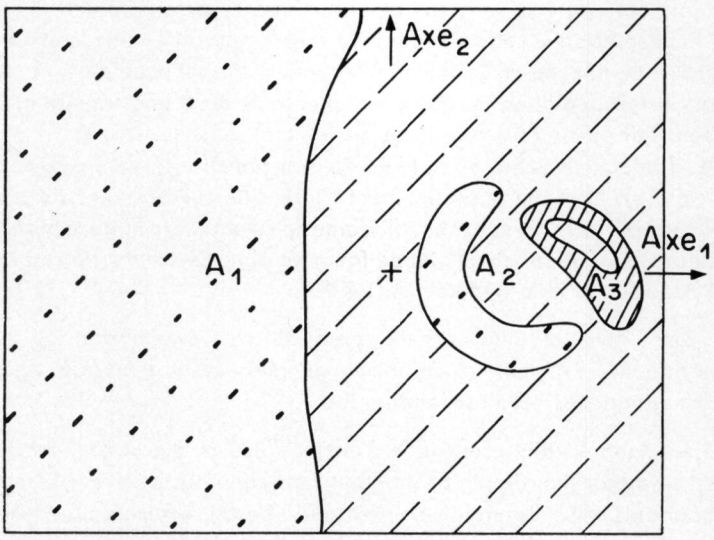


FIG. 7. — *Altitude.*

Altitude.

A_1 : de 1 100 à 1 300 m
A_2 : de 1 300 à 1 500 m
A_3 : de 1 500 à 1 750 m.

Il n'y a pas de relation simple entre le premier axe et les variations de l'*altitude*, bien qu'on constate que les centres des trois classes d'altitude que nous avons distinguées soient effectivement alignés le long de cet axe.

Mais, différents types de végétation coexistent à la même altitude : le faciès 1 à *Trifolium repens* et *Festuca rubra* (1) est limité à la zone comprise entre 1 100 et 1 300 m d'altitude ; mais on y rencontre aussi le faciès 2 à *Nardus stricta* (fig. 2,7 et 8).

La lande à *Vaccinium myrtillus* et *V. uliginosum* (faciès 4) est surtout représentée au-delà de 1 500 m ; mais on la rencontre aussi entre 1 300 et 1 500 m à côté de grandes étendues en *Nardus stricta* surtout aux Nord-Ouest, Nord et Nord-Est.

L'altitude s'exprime le long de l'axe 1 de l'A. F. C. à travers son influence sur la fréquentation du pâturage et l'intensité d'exploitation des parcours : les burons se trouvent généralement en position basse et c'est bien la distance au buron qui influence directement cette intensité d'action des troupeaux comme le montre une analyse du mode d'utilisation des pâturages et de l'espace par faciès :

Faciès 0. — En effet, immédiatement autour du buron se trouve une zone de quelques dizaines de mètres de rayon où sont jetés les fumiers de l'étable, où s'écoulent les purins et sur laquelle le piétinement et la circulation du bétail sont intenses : c'est le domaine des Orties, de *Plantago major*, de *Poa annua*, de *Barbarea* sp., de *Capsella bursa-pastoris*, parfois de *Rumex alpinus*. Sur la frange, on rencontre *Poa trivialis*, *Lolium perenne*, *Festuca pratensis* en peuplements de faible étendue.

Faciès 1. — Au-delà s'étend la zone réservée traditionnellement au parcage de nuit ; le parc suit une large rotation et permet la fumure intensive et périodique d'un terroir de plusieurs hectares. Souvent la pratique du parcage a disparu depuis longtemps mais ses effets se perpétuent parce que le bétail est attiré par l'aspect appétant de la végétation et cette fréquentation assidue suffit à entretenir une consommation intensive de l'herbe et de fortes restitutions. Le parcage de nuit, au moins à l'origine, puis la fréquentation assidue, maintiennent ainsi une végétation à base de *Trifolium repens* et de *Festuca rubra* où se distinguent plusieurs zones.

La zone la mieux enrichie abonde en *Phleum pratense*, *Trisetum flavescens* et *Poa pratensis* (faciès 1*a*). Lorsque le piétinement s'intensifie sur une aire de couchage ou vers les abreuvoirs, le tassement du sol freine le drainage ; l'interaction des fertilisants organiques et du mauvais drainage favorise alors *Deschampsia cespitosa*, plante puissante et rude, assez peu appétée (faciès 1*b*).

Faciès 1 *bis*. — Dès qu'intervient une phase de sous-exploitation ou que le pâturage est abandonné, *Trifolium repens* disparaît mais *Festuca rubra* et *Agrostis tenuis* demeurent longtemps les plantes dominantes.

Faciès 2. — Au-delà d'une distance d'environ 300 m du buron, le parcage n'a plus lieu, les animaux transitent constamment en choisissant ce qui leur plaît et en laissant d'abondants refus. Lorsque l'été s'avance, l'herbe se faisant plus rare, la pâture y devient plus sévère aux dépens des bonnes espèces tandis que les refus particulièrement durs ou piquants continuent d'être négligés. Une végétation à base de *Nardus stricta* peut ainsi se développer (faciès 2) et devenir envahissante. La situation est

(1) Il s'agit principalement de *Festuca nigrescens* Lamk, fétuque rouge gazonnante, commune en montagne, l'une des espèces du groupe *Festuca rubra* L.

aggravée par le fait que le bétail revient toujours se reposer et libérer une grande partie de ses excréments dans les zones où l'herbe est tendre : la « nardaie » subit donc des pertes régulières d'éléments nutritifs au profit des végétations à *Trifolium repens* et *Festuca rubra* situées vers le buron et *Nardus* peu exploité et aux racines puissantes accentue sa compétition sur les autres espèces.

La « nardaie » n'est pas une végétation uniforme et sa composition botanique varie avec l'exposition générale du versant et l'éloignement du buron :

— Au nord-ouest du Massif, très arrosé, la « nardaie » apparaît déjà à 300 m de distance du buron. Mais entre 300 et 500 m, *Festuca rubra* reste abondante, avec une certaine densité de *Poa chaixii* et de *Polygonum bistorta* et peu de *Nardus* si le parcage ou le couchage spontané ont eu lieu de temps en temps, avec une très forte densité de *Nardus* si le sol est resté pauvre. Plus loin, *Festuca rubra* se raréfie au fur et à mesure de la baisse de fréquentation par le bétail, au profit de *Deschampsia flexuosa* qui prend une importance notable vers 700 m du buron (faciès 2*b*). *Poa chaixii* et *Polygonum bistorta* ne semblent pas sensibles à l'éloignement.

— Au sud-est, moins arrosé, le sol est moins lessivé et *Nardus stricta* commence à apparaître en quantité notable à une distance plus grande du buron, plutôt entre 500 et 700 m, avec un bon accompagnement de *Festuca rubra*, *Ranunculus acris* et *Anthoxanthum odoratum* mais une présence plus sporadique du *Poa chaixii*. Les nardaies très denses sont repoussées encore plus loin entre 700 et 1 000 m, parfois davantage. La fréquentation de lieux éloignés paraît ainsi plus active sur les versants mieux exposés et plus secs. Comme précédemment, *Festuca rubra* diminue et *Deschampsia flexuosa* augmente avec l'éloignement.

Quel que soit le versant, la « nardaie » peut connaître une phase d'abandon et être particulièrement envahie par les espèces arbustives des landes subalpines (faciès 2*c*).

Faciès 3 *et* 4. — Avec l'éloignement croissant du buron, entre 700 et 1 300 m, la végétation est de moins en moins broutée et la « nardaie » fait place insensiblement à la pelouse de *Deschampsia flexuosa* et « *Festuca duriuscula* » (faciès 3) puis à des landes de type subalpin (faciès 4). Les faciès herbeux sans *Nardus* révèlent une phase de pâturage passagère, destructrice des arbustes de la lande mais insuffisante pour l'accumulation des refus de *Nardus*. Le passage progressif de la « nardaie » à la lande se traduit par une assez grande proximité des aires de *Nardus* (16), de *Deschampsia* (10) et de *Vaccinium m.* (10) dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse factorielle et par une imbrication en mosaïque sur le terrain.

Le *Faciès* 5 correspond aux combes à neige.

b) *Les facteurs liés au climat.*

Les influences climatiques se manifestent en relation avec l'altitude et l'exposition générale des versants. Replacés dans le plan des axes 1 et 2 de notre analyse factorielle, ces paramètres manifestent une liaison avec la végétation en interaction avec l'intensité d'exploitation.

Dans les secteurs bien pâturés, à *Trifolium repens*, l'apparition du faciès 1*d* à *Avena pubescens*, à *Briza media* et à *Anthoxanthum odoratum* est liée à la frange d'altitude 1 100-1 300 m et à la position sur le flanc Est du Massif du Sancy. Il s'agit de la région

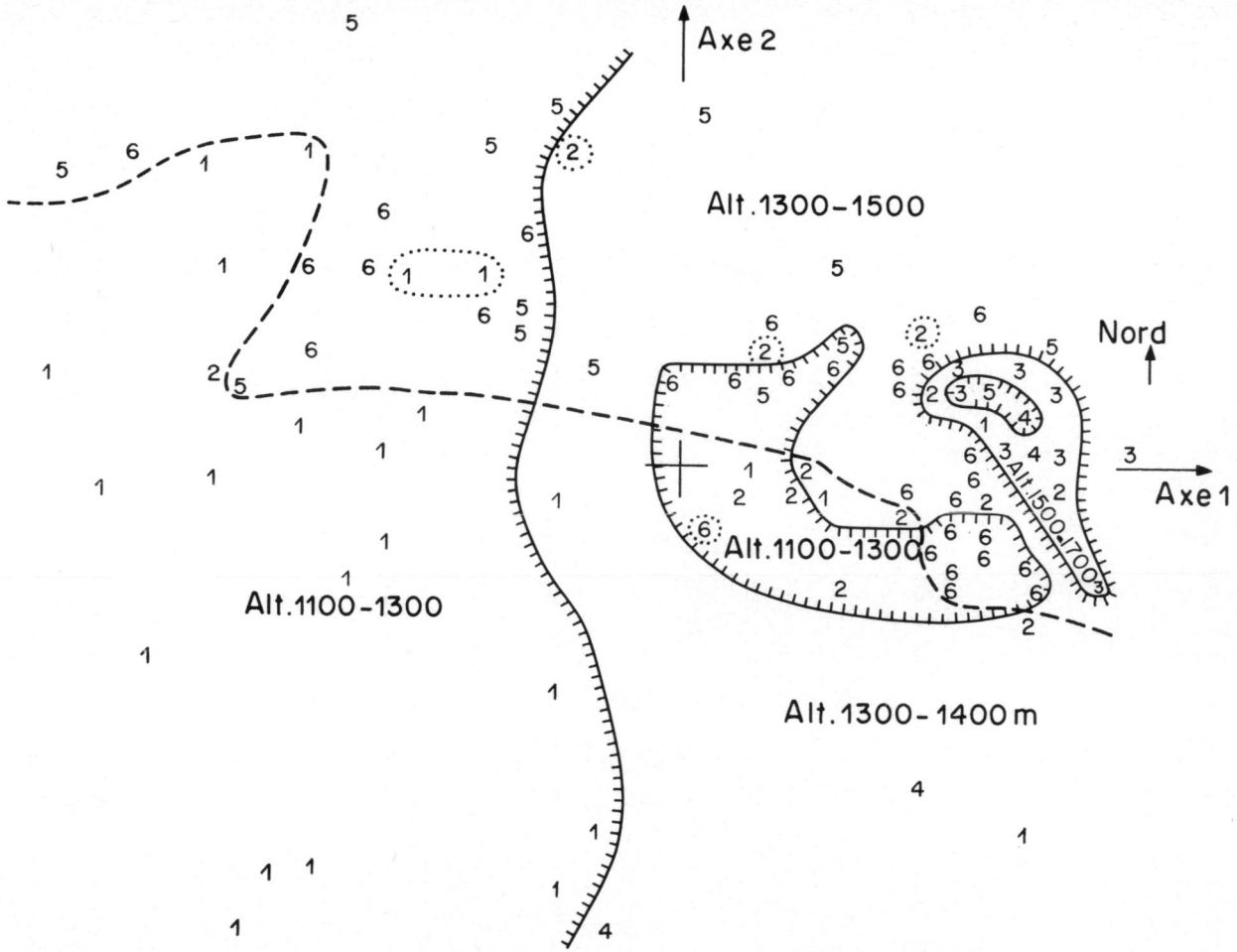


FIG. 8. — *Croisement « altitude-secteur géographique »*

Comparison between altitude and secteur of the range.

Position relative des 6 secteurs :

Distribution of sectors in the range :

Secteur 1 : Sancy Est
2 : Sancy Sud
3 : Massif du Barbier
4 : Sancy Ouest et Centre
5 : Massif de L'aiguiller
6 : Banne d'Orbanche

la moins arrosée du Massif des Dore (1) qui reçoit environ 1 200 mm d'eau par an (fig. 1). Le faciès 1*c* à *Poa chaixii*, *Polygonum bistorta* et *Galium saxatile* est lié aux secteurs plus pluvieux soit en raison de l'altitude, soit en raison de l'exposition générale du versant. Mais cette réponse au régime pluviométrique peut être modifiée par l'effet de facteurs agissant localement. Par exemple, une fréquentation très assidue par les animaux et un apport important d'éléments par les bouses et les pissats favorise le faciès à *Phleum p.* et *Trifolium r.* (faciès 1*a*) et fait disparaître *Avena pubescens* ou *Poa chaixii*. Un sol à texture plus sableuse et filtrant a créé localement une station sèche dans la région Sud-Ouest du Sancy, pourtant très pluvieuse (faciès $1d_2$ à *Avena pubescens* et *Rhinanthus minor*).

Les faciès de transition de *Trifolium repens* à *Nardus stricta* (1 *bis*) qu'on rencontre fréquemment dans la même frange d'altitude 1 100-1 300 m, est nettement plus riche en *Poa chaixii*, *Polygonum bistorta* et *Galium saxatile* sur les versants Nord et Nord-Ouest des Dore (Massifs de la Banne d'Ordanche et de l'Aiguiller) que sur les versants Sud et Est du Sancy où par contre, *Ranunculus spp* (2) et *Anthoxanthum od.* sont plus abondantes. La pluviométrie annuelle varie d'environ 1 600 mm sur les premiers à 1 200 mm sur les seconds. Là encore, la distinction de végétation selon le secteur géographique reste assez grossière, des facteurs particuliers, couchage du bétail, topographie, pouvant l'infléchir localement.

Les « nardaies » denses (faciès 2) qui s'échelonnent entre 1 100 à 1 500 m d'altitude ne contiennent généralement *Poa chaixii* et *Polygonum bistorta* en proportion notable que dans la frange supérieure, 1 300-1 500 m. Mais il y a quelques exceptions significatives : au Nord-Ouest, certains relevés de la frange inférieure, 1 100-1 300 m, contiennent *Polygonum bistorta*, tandis qu'au Sud-Est certains relevés de la frange supérieure ne contiennent à l'inverse ni *Poa chaixii* ni *Polygonum bistorta*. Les « nardaies » de la frange inférieure sont plus fournies en *Anthoxanthum odoratum*. Par contre, toutes les « nardaies » contiennent *Galium saxatile* sans distinction d'exposition.

Finalement, les secteurs très arrosés sont ceux où le groupe *Poa chaixii*, *Polygonum bistorta*, *Galium saxatile* est le plus fréquent ; les secteurs moins arrosés ont davantage d'*Anthoxanthum odoratum*, avec une dominante d'*Avena pubescens* lorsqu'ils sont bien pâturés. Des facteurs locaux liés à la fréquentation du bétail, à la topographie et au sol peuvent infléchir cette tendance générale. Nous allons donc maintenant aller plus loin dans l'étude des facteurs stationnels en examinant les paramètres édaphiques.

c) *Les facteurs liés au substrat.*

La Roche Mère.

Nous ne nous sommes pas attachés à une étude pédologique proprement dite. Les analogies de situation avec le Massif du Cantal permettent de se reporter à l'étude de Hétier (1971) qui a défini les chaînes de sol en situation drainée en fonction du type climatique et de la roche mère (tabl. 6).

Les sols formés sur roches vocaniques basiques ont la propriété de contenir une proportion notable de minéraux amorphes. D'après Hétier (1973) « le caractère d'andosol devient indiscutable à partir de teneurs en amorphes silico-alumineux attei-

(1) Le déficit climatique en période de végétation dépasse 100 mm environ 3 années sur 10.
(2) Renoncules âcre et bulbeuse confondues.

TABLEAU 6

Principaux types de sols (d'après Hétier, 1971)
Chief types of soils

Altitude	Etage	Basaltes	Phonolite et trachytes
1 400-1 600	Subalpin	Ranker andique	Ranker cryptopodzolique
1 200-1 400	Montagnard supérieur	Andosol humifère	Sol ocre podzolique humifère
1 100-1 300	Montagnard moyen	Andosol	Sol ocre podzolique
700-1 100	Montagnard inférieur	Sol andique	Sol brun ocreux

gnant 10 p. 100 du sol tamisé à 2 mm ». Sur les roches volcaniques acides, la série des sols se rapproche de la série classique observée sur les roches cristallines acides.

L'histoire géologique très complexe qui caractérise le Massif des Monts Dore nous a amené à tenir compte de ce facteur roche mère dans notre étude.

Nous avons recherché sur la carte géologique au 1/80 000e la nature de la roche mère correspondant à chaque relevé ; cela a été possible sans ambiguïté dans quatre-vingt cas sur quatre-vingt-quatorze.

Ensuite nous avons étudié la répartition de ce paramètre dans le plan des axes 1 et 2 de l'A.F.C.

Nous avons constaté que la distribution des roches mères dans ce plan se fait indépendamment du type de végétation que ce soit dans les pâturages très fréquentés à *Trifolium repens* ou dans les pâturages extensifs à *Deschampsia flexuosa*. Il est clair que les influences anthropiques et climatiques sont prépondérantes et que la roche mère n'a pas de rôle apparent dans le large échantillonnage réalisé.

On ne peut cependant pas exclure entièrement toute influence de la roche mère, au moins localement, lorsque l'interaction avec les influences climatiques, la position topographique et le régime de pâturage aboutit à des caractères chimiques ou physiques du sol particuliers.

Caractères physiques et chimiques des sols.

Nous avons limité notre étude des sols à l'horizon supérieur (0 à 15 cm) ; plus particulièrement à la tranche « moyenne » (5 à 7,5 cm) qui fournit les échantillons et les résultats les plus fiables. En effet, dans les sols étudiés, l'analyse des horizons de surface (0 à 5 cm) présente des difficultés liées à leur extrême richesse en matières organiques.

C'est dans cet horizon supérieur que se produisent le plus d'échanges entre la végétation et son substrat et que se manifestent le mieux les facteurs externes, anthropiques notamment.

Nous avons retenu dix caractéristiques du sol dont la répartition dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse était remarquable.

La densité apparente du sol, le pH, le taux de C (et moins nettement le *rapport C/N*) varient régulièrement en fonction de la distance au buron (fig. 6,9, 10 et 11).

Le rapport C/N traduit l'activité biologique du sol. Il est plus faible dans les zones très fréquentées par les animaux, caractérisées par la présence abondante de *Trifolium repens* et la proximité du buron.

La densité apparente du sol traduit aussi cette activité mais d'une façon plus nette

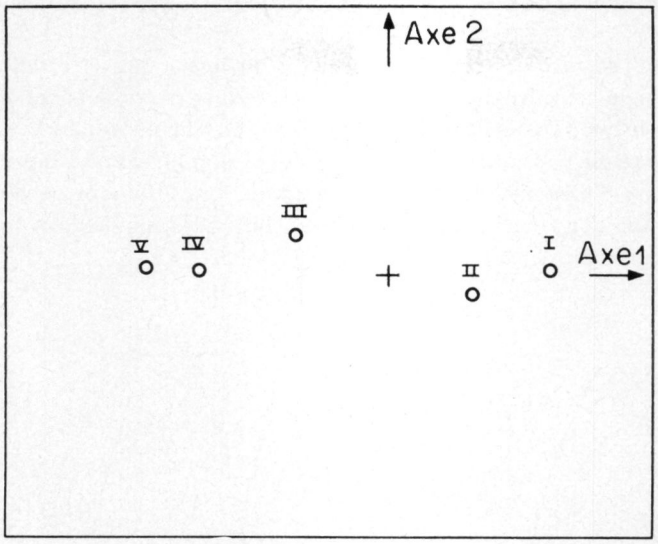


FIG. 9. — *Densité apparente du sol : barycentres des classes I à V.*
Classes : I = 0,22 à 0,28 ; II = 0,28 à 0,32 ; III : 0,32 à 0,42 ; IV = 0,42 à 0,52 ; V = 0,52 à 0,62.
Apparent density of soil.

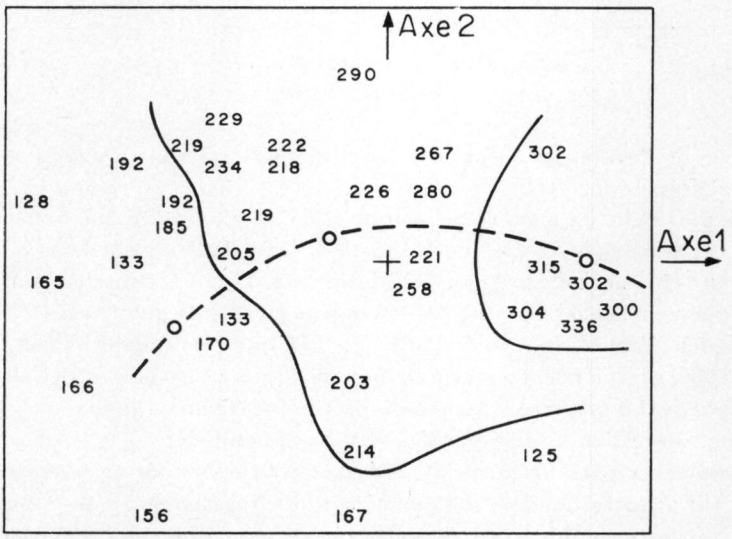


FIG. 10. — *Carbone p. 1 000 de terre fine.*
Carbone p. 1 000 of fine earth.

encore (fig. 9). De l'intensité de la pâture et de la fréquentation dépendent la proportion de refus et le rythme de décomposition des racines (cf. fig. 12) ainsi que l'état de tassement du sol.

Le pH dépend de facteurs assez nombreux : du lessivage, en relation avec la pluviométrie qui tend à croître avec l'altitude et l'ouverture aux influences de l'Ouest ; de la nature de la matière organique brute cédée par la végétation ; du rapport entre la masse végétale consommée par le bétail et celle qui retourne directement au sol ; des transports d'éléments nutritifs des parcours vers les zones de parcage. En fait, pH et végétation apparaissent en étroite interrelation le long de l'axe 1 (cf. fig. 11)

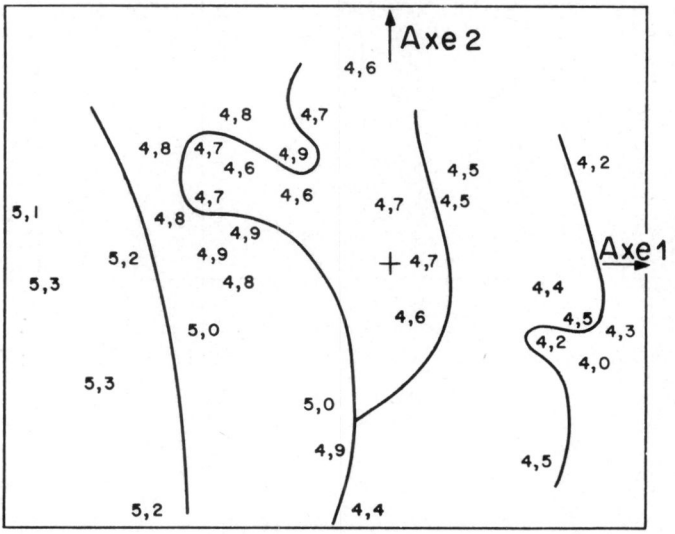


FIG. 11. — *pH eau du sol.*
Water pH of soil.

et le moteur de l'évolution du pH est avant tout ici l'intensité d'exploitation par le bétail. Toutefois, le faciès à *Trifolium repens* et *Poa chaixii* (secteur humide) paraît plus acide, plus riche en matière organique et à C/N plus élevé que le faciès à *Trifolium repens* et *Avena pubescens* et manifeste ainsi l'effet de l'exposition.

La texture et le stock d'azote dans le substrat (fig. 12 et 13) caractérisent une pédogenèse étroitement liée à l'intensité du lessivage et au type de pâturage.

Les fortes teneurs en azote ($>$ 17 p. 1 000) et les faibles teneurs en sable ($<$ 100 p. 1 000) caractérisent les faciès à *Poa chaixii*, *Polygonum bistorta* et *Galium saxatile* qui correspondent à une fréquentation du bétail modérée à nulle sous un régime pluviométrique très lessivant réglé par l'exposition et l'altitude.

Les faibles teneurs en azote ($<$ 14 p. 1 000) et les fortes teneurs en sable ($>$ 200 p. 1 000) correspondent soit aux pâturages très fréquentés à *Phleum*, soit aux pâturages des secteurs plus secs à *Avena pubescens*, soit aux faciès à *Rhinanthus minor* et *Genistella sagittalis* des sols grossiers développés sur éboulis ou sur microbanquettes alluviales.

L'intensité du pâturage et le régime hydrique paraissent être ainsi en liaison complexe (interactions) avec les variations de texture et de teneurs en azote du sol ;

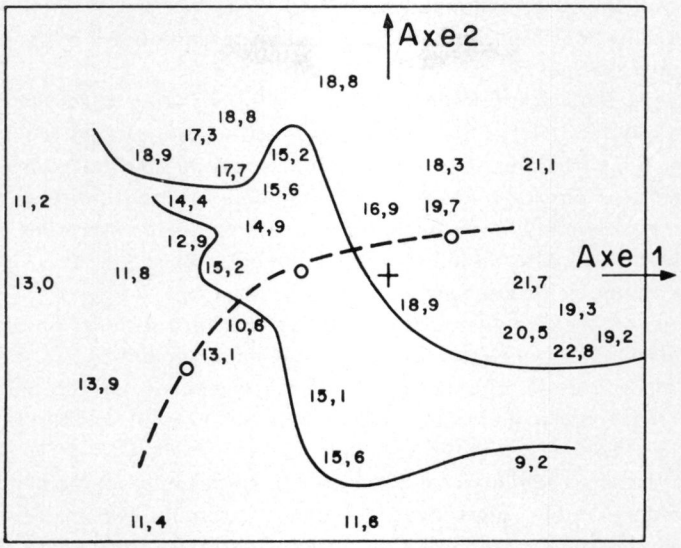


FIG. 12. — *Azote p. 1 000 de terre fine : 3 classes.*

Nitrogen p. 1 000 of fine earth : three classes.

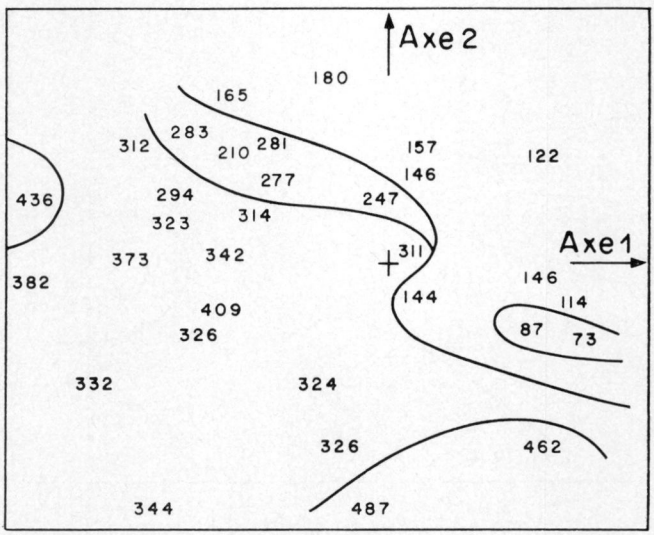


FIG. 13. — *Sables moyens et grossiers* (50 à 2 000 μ) *en p. 1 000 des matières minérales de la terre fine.*

Sand (50-2 000 μ) p. 1 000 *mineral earth.*

la nature du substrat ne se manifeste que très localement lorsqu'il y a eu accumulation d'éléments sableux ou gravillonnaires.

La répartition des *éléments nutritifs* du sol en relation avec le type de végétation est assez complexe, parfois confuse :

Ainsi, les faciès riches à *Phleum* ne manifestent pas une richesse particulière sans doute parce que les critères dont nous disposons ne sont pas les meilleurs pour les caractériser. En particulier, la quantité d'azote assimilable au cours d'une saison végétative ne peut pas faire l'objet d'un test simple au laboratoire et c'est pourtant un facteur prédominant. L'azote total ne donne qu'une image très infidèle et le rapport C/N est l'objet d'une détermination insuffisamment précise en raison de la présence d'une masse racinaire très dense.

Toutefois, on observe une polarisation dans certains secteurs du plan des axes 1 et 2 de l'analyse qui suggère la présence d'un facteur limitant :

A une très grande abondance de *Ranunculus acris* correspond un rapport $K^+/Ca^{++} + Mg^{++}$ particulièrement faible, avec un niveau notable de disponibilité en azote (fig. 14).

A la présence régulière de *Briza media* correspond également un rapport $K^+/Ca^{++} + Mg^{++}$ faible, mais avec de faibles disponibilités en azote (végétation maigre) et la pluviométrie modérée du secteur Sud-Est ([1]). Sur ce type de végétation, la fréquentation assidue du bétail favorise *Helianthemum nummularium* et accentue la pauvreté absolue du sol en potasse, le phosphore, le calcium et le magnésium restant à un niveau moyen.

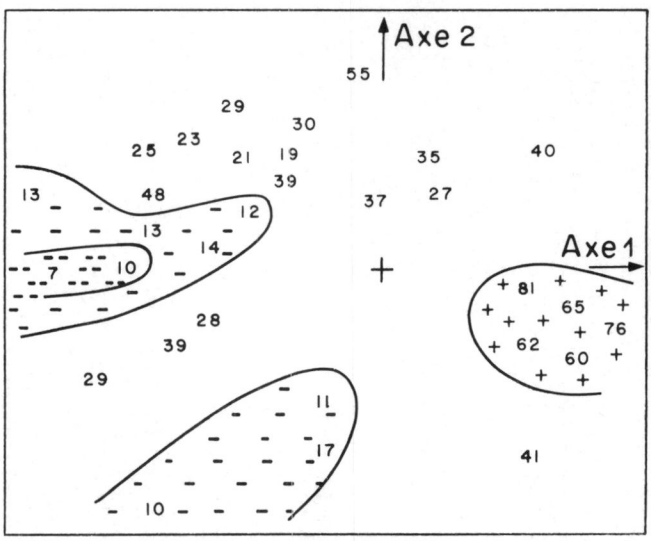


FIG. 14. — *Rapport* $\frac{K^+}{Ca^{++} + Mg^{++}} \times 100.$

Ratio $\frac{K^+}{Ca^{++} + Mg^{++}} \times 100.$

([1]) *Briza media* est abondante aussi dans les mouillières ; elle traduit surtout l'oligotrophie du milieu.

A une grande abondance de *Nardus stricta* correspond une somme $Ca^{++} + Mg^{++}$ particulièrement faible et un rapport $K^{+}/Ca^{++} + Mg^{++}$ particulièrement élevé.

Les faciès à *Deschampsia flexuosa* sont moins pauvres en calcium et magnésium que la Nardaie mais le pH est toujours bas.

A l'opposé, les faciès à *Trifolium repens* ont un pH nettement plus élevé et les teneurs en calcium et magnésium assez élevées, avec un fléchissement net dans certains sites à *Poa chaixii*.

Les faciès à *Rhinanthus minor* sont les plus pauvres en phosphore assimilable.

Les faciès à *Succisa praemorsa* sont pauvres en tous éléments.

2. — *La répartition des variables du milieu dans le plan des axes 3 et 4*

Dans le plan des axes 3 et 4, nous n'avons pris en considération que les relevés qui ont une contribution notable sur l'une de ces axes et nous avons obtenu la répartition des variables du milieu en opérant la substitution habituelle, numéro de relevé-valeur de la variable considérée dans ce relevé.

Nous n'avons observé qu'une répartition assez grossière des altitudes et plus grossière encore des « distances au buron ». En fait, *ce plan explicite surtout les relations entre les espèces de la nardaie et de la lande à myrtille*, assez médiocrement exprimées dans le plan des axes 1 et 2.

Nous avons vu que le passage de la nardaie à la lande se faisait progressivement au fur et à mesure de l'éloignement du buron et de la montée en altitude. Ce passage progressif expliquerait la répartition assez floue de ces deux facteurs dans ce plan. Le régime de pâturage garde cependant toute sa valeur explicative. *Nardus* est surtout présent aux altitudes modérées accessibles aux troupeaux ; il est accompagné par *Danthonia decumbens* dans le secteur Nord-Ouest particulièrement arrosé, par *Calluna vulgaris* et *Rhinanthus* dans les secteurs à régime hydrique moins lessivant. Au contraire les espèces peu résistantes au pâturage : *Arnica*, *Jasione*, *Vaccinium m. et ul.* voisinent avec *Poa alpina* plus typique des altitudes élevées.

En ce qui concerne les conditions de sol, l'examen des données dans ce nouveau plan n'a guère apporté d'informations nouvelles et le critère « Roche mère » n'a pas paru plus discriminant dans ce plan que dans le précédent.

Le tableau 7 résume l'ensemble des relations entre les groupes d'espèces et les conditions écologiques.

TABLEAU 7

Groupes d'espèces affines et leur écologie
Ecology of groups of species

Lolium perenne *Festuca pratensis* *Ranunculus repens* *Poa trivialis*	Passage et pâturage très fréquents ; très fortes fumures organiques, environs immédiats du buron.
Dactylis glomerata *Phleum pratense* *Trisetum flavescens* *Cynosurus cristatus* *Chenopodium bonus henricus* *Taraxacum officir.ale*	Pâturage régulier et fréquent, zone fortement enrichie, végétation abondante.

Trifolium repens *Poa pratensis* *Veronica chamaedrys* *Stellaria graminea* *Galium verum* *Achillea millefolium* *Ranunculus acris* *Plantago lanceolata*	Pâturages réguliers et fréquents, toutes expositions. Zone de parcage ancien ou récent.
Avena pubescens *Briza media* *Stachys officinalis* *Chrysanthemum leucanthemum* *Trifolium pratense* *Centaurea nigra* *Thymus serpyllum*	Altitude modeste (1 100-1 300 m). Secteur Sud-Est moins arrosé, pâturage régulier et fréquent ; végétation méso à oligotrophe.
Koeleria macrantha *Potentilla verna* *Helianthemum nummularium*	Altitude modeste (1 100-1 300 m). Secteur sud-est moins arrosé, végétation oligotrophe fortement broutée.
Festuca rubra	Large extension = pâturages fréquentés, sur sols acides.
Agrostis tenuis *Gentiana lutea* *Meum athamanticum*	Très large extension = Pâturages et landes montagnardes et subalpines.
Lathyrus montanus *Selinum pyrenaeum*	Large extension : depuis les pâturages à *Trifolium repens* modérément pâturés jusqu'aux landes.
Poa chaixii *Polygonum bistorta* *Galium saxatile*	Peu sensibles à l'intensité de la fréquentation. Régions très arrosées, sols acides, étages montagnard et subalpin.
Rhinanthus minor *Genistella sagittalis* *Genista tinctoria*	Sols plus ou moins sableux ou grossiers.
Nardus stricta *Carex caryophyllea* *Potentilla tormentilla* *Anthoxanthum odoratum*	Pâturage fréquent mais incomplet laissant des refus.
Danthonia decumbens *Polygala vulgaris*	Faciès de la nardaie sur sols particulièrement lessivés.
Succisa praemorsa	Proximité de la nappe phréatique ou forte pluviométrie, sol acide très pauvre en tous éléments.
Deschampsia flexuosa « *Festuca duriuscula* » *Leontodon pyrenaicus*	Pâturage irrégulier mais suffisant pour la maîtrise des plantes arbustives. Etages montagnard et subalpin.
accinium myrtillus *Vaccinium uliginosum* *Genista pilosa* *Calluna vulgaris* *Arnica montana*	Landes montagnardes et subalpines. Plantes arbustives ou non, sensibles au pâturage.
Poa alpina	Etage subalpin.

Deschampsia cespitosa	Sol engorgé d'eau avec piétinement et bousage importants.
Brachypodium pinnatum	Pentes fortes exposées au sud, étage montagnard.
Festuca paniculata	Pentes fortes bien exposées, étage subalpin.
Sanguisorba officinalis *Lotus uliginosus* *Carex panicea*	Régime hydrique abondant ou sols saturés d'eau.

Conclusion

Dans le cadre géographique du massif des Monts Dore l'application de l'analyse factorielle des correspondances aux données fournies par l'analyse de la végétation nous a permis de montrer qu'une opération simple, l'inscription d'une donnée concernant une espèce ou un descripteur sur les graphes sortant de l'ordinateur, permet d'établir des comparaisons, de décrire clairement les relations entre espèces et d'en dégager la signification écologique. Deux espèces voisines sur le graphe livré par l'ordinateur n'ont pas forcément la même amplitude écologique et il en résulte une ambiguïté pour l'interprétation. Nous pensons avoir contribué à lever cette ambiguïté qui pouvait conduire à des interprétations abusives ou à une sous-estimation des possibilités complètes de cette méthode d'analyse.

A la suite de Luquet (1926), de Cusset et de La Chapelle (1961) dans les Monts Dore, de King et Nicholson (1964) en Ecosse, de Spatz (1971) dans les Alpes de l'Algau, de Klapp (1951) dans l'Eiffel, nous avons pu mettre en évidence les facteurs qui agissent sur les végétations pastorales et en dégager les poids relatifs et leurs interactions. Dans les Monts Dore, ce sont notamment la fréquentation du troupeau, l'altitude et l'exposition.

Nous avons abordé volontairement cette étude avec une méthode d'analyse quantitative de la végétation. Force est de constater que nous retrouvons des catégories homologues de celles de La Chapelle et un raisonnement écologique très voisin. Mais nous avons pu mieux préciser les termes de passage d'une catégorie à l'autre et faire ressortir d'importantes différences entre les faciès des formations typiquement herbagères en relation avec les conditions écologiques :

— *Faciès 0 à Poa trivialis* des alentours immédiats des burons, fortement piétinés et abondamment fumés,

— *Faciès 1 à Trifolium repens et Festuca rubra.*

Zone des parcages ou du pâturage intense avec de fortes restitutions organiques :

sous faciès à Phleum dans la partie la plus riche ;

sous faciès à Deschampsia cespitosa lorsqu'à l'enrichissement par les déjections est associé un drainage médiocre ;

sous faciès à Poa chaixii sur les versants bien arrosés lorsque la fréquentation du bétail est moins intense ;

sous faciès à Avena pubescens sur les versants plus secs lorsque la fréquentation du bétail est moins intense ;

— *Faciès* 2 *à Nardus stricta.*

Zone des parcours proches du buron, bien fréquentés actuellement ou dans une période antérieure :

sous faciès à Festuca rubra dans les parcours les plus fréquentés actuellement ;
sous faciès à Deschampsia flexuosa et *Festuca « duriuscula »* dans les parcours peu fréquentés actuellement ;
sous faciès à Vaccinium myrtillus, V. uliginosum, Genista pilosa, Calluna vulgaris dans les parcours actuellement en voie d'abandon ;

— *Faciès* 3 *à Deschampsia flexuosa* et *Festuca « duriuscula »* des parcours peu fréquentés.

— *Faciès* 4 *à V. myrtillus, V. uligosum, Genista pilosa, Calluna vulgaris* des landes peu fréquentés.

Cette classification concerne le domaine bien délimité des pâturages compris entre 1 100 m et 1 600 m d'altitude, sur sols bien drainés et de pente inférieure à 40 p. 100. Elle fait ressortir l'importance prépondérante de la fréquentation des animaux pâturants et de la circulation des éléments fertilisants des déjections. En second lieu apparaît l'influence du régime hydrique selon l'exposition du versant et accessoirement en fonction de variations locales du sol ; cet effet d'exposition est surtout sensible dans les pâturages à *Trifolium repens* et *Festuca rubra* qui n'ont pas reçu le parc de longue date (opposition du faciès à *Poa chaixii* au faciès à *Avena pubescens* et *Helianthemum num.* L'altitude n'a qu'une influence relative d'éloignement des burons, généralement situés vers la base des estives.

Dans un prochain article nous traiterons de la répartition et de l'extension géographique de ces faciès de végétation pastoraux dans l'ensemble des Monts Dore en rapport avec les conditions de pente et l'altitude, et de leurs possibilités d'amélioration.

Reçu pour publication en juillet 1978.

Remerciements

Nous remercions R. Tomassone (Laboratoire de Biométrie I.N.R.A. Jouy-en-Josas), M. Roux (Laboratoire de Statistiques Mathématiques, Université de Paris V) et J. Vournas (Stagiaire, Diplôme en Statistiques Mathématiques) pour leurs conseils et la réalisation concrète de l'Analyse Factorielle des Correspondances. Nous remercions également R. Delpech (Chaire de Botanique et Ecologie végétale I.N.A.P.G.) et M. Kerguelen (Groupe des Laboratoires et Services de La Minière, I.N.R.A., Guyancourt) pour l'aide apportée dans la nomenclature botanique et l'interprétation écologique.

Summary

Studies of ecology and productivity of mountainous pastures in Monts Dore

I. — *Vegetation analysis*

This paper reports a study of agricultural types of vegetation in pastures and rough grazings of Monts Dore (volcanic mountains in French Massif Central) and their ecological determinants.

An analysis of quantitative features of vegetation by « Analyse Factorielle des Correspondances »

is conducted before environmental features are introduced to elucidate ecological significance of groups of species determined.

With a common basis of *Agrostis tenuis*, *Meum athamanticum* and *Gentiana lutea*, different facies of pastoral vegetations, strongly related with cattle activity, altitude and general exposure of versants are described.

Zusammenfassung

Okologie der weiden der « Monts Dore »

I. — *Analyse der Vegetation*

Diese Untersuchung soll Hinweise zur einen landwirtschaftlichen Typologie der Vegetation der Weiden der « Monts Dore » und ihrer ökologischen Deutung liefern.

Sie beruft sich auf die faktorielle Analyse der Korrespondenzen, um die die Vegetation betreffende quantitativen Angaben zu analysieren und schlägt eine Methode für die Einführungder die Umgebung betreffenden Angaben vor, um die ökologische Deutung zu erleichtern.

Auf einem gemeinsamen, auf *Agrostis tenuis Meum athamanticum* und *Gentiana lutea* beruhenden Florenhinkrgrund werden verschiedene Weidenfazies erkannt, die den von Pflanzensoziologen beschriebenen Kategorien sehr nah und mit der Viehttigkeit, der Höhenlage und der Gesamtlage der Abhänge eng verbunden sind.

РЕЗЮМЕ

Экология горных пастбищ мон-дор.

I. — Анализ растительности.

Ф. де МОНТАР, Л. ГАШОН.

Изучалась агрономическая типология пастбищ в горах Дор. Делается попытка интерпретации их экологии.

Интерпретация эта требует, для ее облегчения факториального анализа соответствий между анализом и численными данными растительности, и применения метода интродукции данных среды.

На фоне обычной флоры, с преобладанием полевицы (Agrostis Tennis), меума (Meum атнамаитісum) и горечавки (Geитіаиа lutea), наблюдается существование разных пастбищных категорий, близких к уже описанным фитосоциологами, и тесно связанных с активностью выпасных животных, высотой над уровнем моря и общей экспозицией склонов.

Références bibliographiques

BOCK C., PRELLI R., 1975. Carte des groupements végétaux de la Vallée de Chaudefour. *Fac. Sci. Clermont-Ferrand.*

CUSSET G., DE LA CHAPELLE B., 161-62. Etude botanique dans les Monts Dore. *Rev. Sci. Nat. Auvergne*, 1961, **27,** 17-82, 1962, **28,** 13-82.

DAGET Ph., POISSONET J., 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. *Ann. agron.*, **22** (1), 5-41.

DURAND A., 1946. *La vie rurale dans les massifs volcaniques des Dores, du Cézallier, du Cantal et de l'Aubrac.* 1 ouvrage, 525 p. imprimé à Aurillac.

ESCOFFIER-CORDIER B., 1969. L'analyse factorielle des correspondances. *Cahiers du B.U.R.O.*, Paris, n° 13, 139-155.

FOURNIER P., 1934-1940. *Les quatre flores de France.* Ed. P. Lechevalier, Paris.

HETIER J. M., 1971. Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol.*, **2,** 51-82.

HETIER J. M., 1973. Caractères et répartition des sols volcaniques du Massif Central. 2e partie. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol.* **2,** 97-114.

INERM-CETEGREF-SCEES, 1976. *Enquête pastorale. Recensement des unités pastorales de la zone de montagne française.* 250 p., INERM Grenoble.

KING J., NICHOLSON, 1964. Grasslands of the Forest and Subalpine Zones. « *The vegetation of Scotland* » (Oliver and Boyd, Edimbourg), chap. 6, 168-215.

KLAPP E., 1951-1954. Cité par VOISIN, 1957 dans « *Productivité de l'Herbe* ». Ed. Flammarion, 368-375.

LUQUET A., 1926. Esquisse phytogéographique du Massif des Monts Dore. *Rev. Géog. Alpine*, XIV, fasc. III, 513-572.

De MONTARD F., ROUX M., 1972. Une application de l'Analyse Factorielle des Correspondances : le classement des pâturages des Monts Dore. *Colloque sur les Méthodes numériques dans les Sciences Biologiques*. Orléans, 16-17 mars 1972.

SPATZ G., 1970. *Pflanzengesellschaften und Leistungen von Allgäuer Alpweiden*, Thèse Munich.

TOMASSONE R., 1970. L'analyse factorielle des correspondances. *3rd conference of the Advisory Group of Forest Statisticians*. Jouy-en-Josas.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets cutres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 10C. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 12-1978

Dépôt légal : 4e trimestre 1978. N° d'impression : 25864

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1978	France	Étranger	Le N°
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOLOGIE-ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	254 F	281 F	85 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	300 F	330 F	65 F
ANNALES D'HYDROBIOLOGIE (2)			

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

(2) *Les Annales d'Hydrobiologie* cessent de paraître à partir de 1978.

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 64 F — Étranger sauf R. F. A. : 75 F
— Le numéro : France : 21 F — Étranger sauf R. F. A. : 27 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **53,50 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **52,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **35,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **150,00 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **150,00 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **85,00 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **58,85 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **120,00 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition INRA-CNRS.
549 p., 1973 ..... **160,50 F**

Recherches acridiennes à Madagascar.
262 p., 1972 ..... **80,00 F**

IVe Conférence du groupe international d'étude des virus et des maladies à virus de la vigne, Colmar 16-18 juin 1970.
211 p., 1972 ..... **60,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1978, **29** (3), 209-310.

Table des matières

B. ITIER, A. PERRIER, G. GOSSE. — Présentation d'une étude analytique de l'advection. III. — Vérification expérimentale du modèle 209

R. BLANCHET, N. GELFI. — Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez le soja (cv Amsoy 71 et Hodgson) 223

P. GAILLARDON, R. CALVET, Elisabeth ROUGETET, J. C. GAUDRY. — Etudes préliminaires du rôle de la nature des matières organiques dans les phénomènes d'adsorption des herbicides 243

J. RIVIÈRE. — Etude d'un procédé d'épuration par compostage préalable au cours de la fabrication de pâte à papier 257

F. de MONTARD, L. GACHON. — Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. I. — Application de l'analyse factorielle des correspondances à l'analyse de la végétation 277

Contents

B. ITIER, A. PERRIER, G. GOSSE. — Analytical study of local advection. III. — Experimental control of the model 209

R. BLANCHET, N. GELFI. — Relations between leaf growth, transpiration and production in soya bean (cv Amsoy 71 and Hodgson) 223

P. GAILLARDON, R. CALVET, Elisabeth ROUGETET, J. C. GAUDRY. — Preliminary studies on the part played by the nature of the organic matter in herbicide adsorption phenomenon 243

J. RIVIÈRE. — Study of a purification system through a previous compost formation during pulp making process 257

F. de MONTARD, L. GACHON. — Studies of ecology and productivity of mountainous pastures in Monts Dore. I. — Vegetation analysis. 277

Les Annales agronomiques figurent dans Currents Contents

I.N. 7.036.0011.5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 4

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 29 (4) 311-420 (1978)
FR ISSN 0003-3839.

AAG
29.4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— M. HALLAIRE, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— J. PONCHET, Chef du Département de Pathologie végétale, 06602 Antibes.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès, Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (4), 311-318.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Mesure de l'aire de la surface totale des argiles avec l'éthanediol. Protocole expérimental et méthode de calcul

P. CHASSIN et Brigitte LE BERRE

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

Résumé

Nous avons déterminé, à partir des cinétiques de désorption, la quantité d'éthanediol au contact des surfaces de montmorillonites ayant des charges variables et saturées par différents cations.

La quantité d'éthanediol interfoliaire (Q) est directement reliée à la chaleur d'hydratation du cation (A) et à la capacité d'échange du silicate (D) par

$$Q = 25 + 0{,}033\,7 . A . \frac{D}{v}$$

où Q est exprimé en p. 100, D en eq kg^{-1}, A en kcal/mole.

v : valence du cation échangeable.

Si nous supposons que la surface spécifique de la montmorillonite est 800 $m^2\ g^{-1}$, l'encombrement moléculaire de l'éthanediol adsorbé est

$$\sigma_m = \frac{32{,}94 . 10^{-20}}{1 + 0{,}013\,5\ A . \frac{D}{v}}$$

où σ_m est exprimé en m^2 par molécule.

La relation linéaire existant entre la quantité d'éthanediol adsorbé et les propriétés physico-chimiques de l'argile résulte de l'existence de deux surfaces où l'arrangement de l'adsorbat dépend soit du cation, soit des propriétés moléculaires.

I. — Introduction

La détermination de l'aire de la surface totale des minéraux argileux avec l'éthanediol est une technique courante car elle permet, associée à d'autres caractéristiques (distance interréticulaire, capacité d'échange cationique...), de calculer approximativement la proportion des différentes argiles minéralogiques présentes dans les fractions granulométriques inférieures à 2 μ extraites des sols. Toutefois, l'estimation de l'aire de la surface, à partir de l'adsorption d'un composé quelconque, ne peut se faire que si l'on connaît d'une part, la quantité de produit nécessaire pour assurer le recouvrement monomoléculaire des surfaces et, d'autre part, l'encombrement moléculaire moyen de la molécule adsorbée ; ce qui n'est pas le cas avec l'éthanediol.

II. — Analyse d'un problème et critiques des méthodes expérimentales proposées

Il est maintenant bien établi que, sur une argile, tout l'éthanediol adsorbé n'est pas au contact des surfaces, mais qu'une fraction non négligeable est localisée dans le volume poral ménagé par les particules élémentaires. C'est ainsi que, sur la montmorillonite calcique, environ 38 p. 100 du diol est localisé dans l'espace interagrégat quand les équilibres sont obtenus à pression de vapeur saturante en diol (Chassin, 1975*a*).

De plus, on a montré que ces deux types de diol adsorbé ne sont pas indépendants, c'est-à-dire que toute augmentation de l'un implique une augmentation de l'autre. Il y a donc une parfaite analogie avec la fixation de l'eau (Prost, 1975).

Toutes les difficultés rencontrées dans la mesure de l'aire de la surface totale des argiles tiennent au fait que l'on ne dispose pas d'une méthode simple et rapide permettant de distinguer le diol au contact des surfaces du diol interagrégat, sans en modifier leur répartition. C'est notamment le cas des cinétiques de désorption car l'élimination préférentielle du diol interagrégat entraîne un départ du diol au contact des surfaces. Pour cette raison, Eltantawy et Arnold (1974) ont proposé une méthode basée sur la détermination des quantités totales d'éthanediol adsorbées à différentes pressions partielles. Dans ce cas, les quantités de diol au contact des surfaces sont surestimées car on prend en compte des quantités non négligeables de diol interagrégat. Nous allons toutefois montrer qu'il est possible d'accéder indirectement aux quantités d'éthanediol au contact des surfaces à partir des cinétiques de désorption qui sont d'une mise en œuvre simple et rapide.

III. — Détermination expérimentale de la quantité d'éthanediol au contact des surfaces de la montmorillonite

Toutes les expériences ont été réalisées sur la montmorillonite de Camp-Berteau inférieure à 2 μ. Les échantillons saturés par différents cations (K^+, Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}) sont conditionnés sous forme de films autoporteurs, déshydratés à 140 °C, placés pendant 24 h à 110 °C et 4 jours à 25 °C dans un dessiccateur contenant de l'éthanediol. Les cinétiques de désorption sont obtenues en mesurant les variations de longueur d'une spirale de quartz placée dans une enceinte thermostatée où règne un vide de 10^{-2} Torr.

On a choisi la montmorillonite car d'une part, on dispose d'une bonne estimation de l'aire de la surface totale, 8.10^5 m^2 kg^{-1} (Mamy, 1968 ; Hénin *et al.*, 1969) et, d'autre part, on obtient, par rétrogradation du lithium (effet Hofmann-Klemen), une série d'échantillons à capacité d'échange variable. Toutefois, la densité de charge du minéral est telle que le complexe classique à deux couches puisse se former ($d_{001} \neq 17$ Å avec un diagramme de diffraction rationnel sur les six premiers ordres). Cette condition imposée au système implique que la capacité d'échange de l'argile soit inférieure à 0,5 eq kg^{-1}.

1. — *Exploitation des cinétiques de désorption*

On a reporté, sur la figure 1, le cas particulier des cinétiques de désorption de l'éthanediol obtenues, à trois températures différentes, avec la montmorillonite Mg^{2+} (CEC = 1,1 eq kg^{-1}). Il est bon de mentionner que le protocole expérimental adopté permet d'obtenir, pour des échantillons semblables, des teneurs initiales identiques en éthanediol.

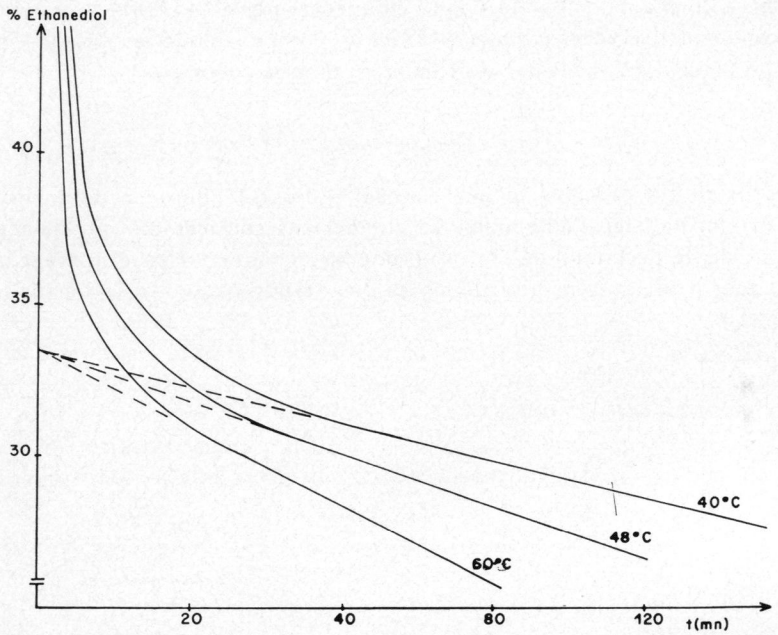


FIG. 1. — *Cinétiques d'évaporation de l'éthanediol adsorbé sur la montmorillonite* Mg^{2+}.
Evaporation kinetics of ethanediol adsorbed on the Mg^{2+} *montmorillonite.*

On peut remarquer que la diminution de poids de l'échantillon devient linéaire en fonction du temps et ceci d'autant plus rapidement que la température de l'expérience est élevée. On constate également que tous ces segments de droite convergent à $t = 0$.

L'obtention d'un régime permanent d'évaporation du diol suggère que l'on est en présence d'un phénomène pur, à savoir que l'on caractérise la disparition du diol au contact des surfaces qui est plus difficilement éliminable que le diol inter-agrégat (énergie d'adsorption, diffusivité réduite). Il s'ensuit que la convergence de tous ces segments de droite pour $t = 0$ indique que l'évaporation du diol au contact des surfaces commence dès la mise sous vide de l'échantillon. Cette conclusion est donc en accord avec la dépendance des deux types de diol adsorbé (voir remarque § I).

Cette interprétation implique donc que le point de convergence est un estimateur de la quantité de diol au contact des surfaces du silicate, à savoir 28 p. 100, 28,7 p. 100, 32 p. 100 et 33,6 p. 100 quand la capacité d'échange de la montmorillonite est saturée

respectivement par du potassium, du sodium, du calcium ou du magnésium. On va montrer que les quantités ainsi déterminées sont bien une estimation du diol au contact des surfaces :

Diffraction des rayons X : sur le complexe montmorillonite calcique-éthanediol la quantité de diol au contact des surfaces, déterminée à partir des densités électroniques est de 32 p. 100 (Reynolds, 1965).

Adsorption compétitive de l'eau et de l'éthanediol sur la montmorillonite : la grande sélectivité de la montmorillonite pour l'éthanediol permet d'estimer la quantité de diol au contact des surfaces (Chassin, 1975*a*, *b*). C'est ainsi que les quantités trouvées sont égales à celles estimées par les cinétiques de désorption.

2. — *Conséquences*

D'après ce qui précède, la partie linéaire des cinétiques de désorption matérialise l'évaporation de l'éthanediol au contact des surfaces qui commence dès la mise sous vide de l'échantillon. Il s'ensuit que les parties courbes observées au début des cinétiques traduisent la disparition des deux types de diol adsorbé sur la montmorillonite.

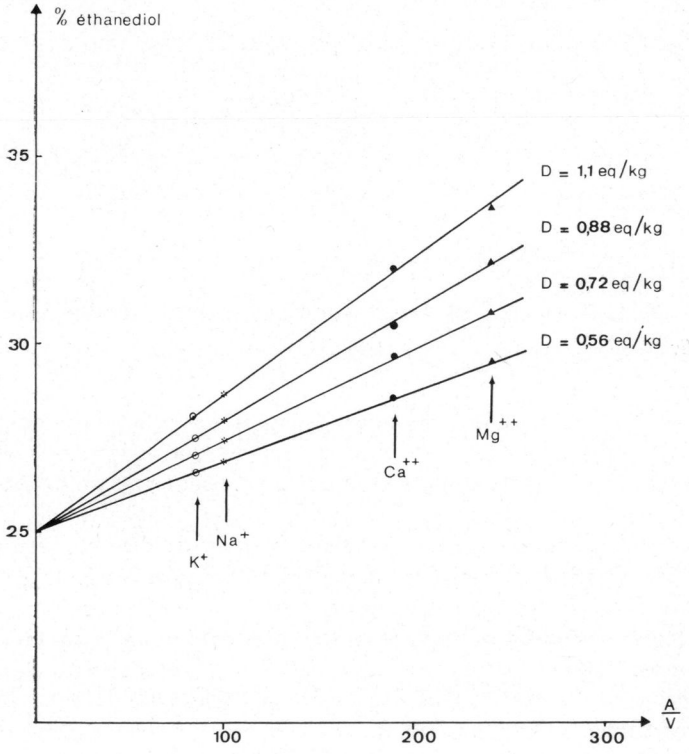


FIG. 2. — *Quantités d'éthanediol au contact des surfaces de la montmorillonite en fonction de la chaleur d'hydratation du cation compensateur et de la capacité d'échange.*

Amounts of ethanediol bound to the montmorillonite surfaces in relation to the hydration heat of the compensating cation and the cation-exchange capacity.

Ces résultats montrent également que les déterminations de la quantité de diol au contact des surfaces au point de cassure des cinétiques ou aux paliers seront toujours inférieures aux valeurs réelles initiales. De plus, il sera très difficile de trouver des relations simples entre ces valeurs et la quantité réelle car ces points matérialisent des situations complexes et transitoires. Par exemple, le point de cassure des cinétiques représente la fin de la diffusion du diol interagrégat à travers un milieu poreux.

3. — *Résultats expérimentaux*

La quantité d'éthanediol au contact des surfaces de la montmorillonite à $P/Po = 1$ et déterminée par extrapolation à $t = 0$ sur trois cinétiques réalisées à différentes températures, est reliée à la chaleur d'hydratation du cation compensateur de la charge (A) et à la capacité d'échange du minéral (D) par (fig. 2) :

$$Q = 25 + 0{,}033\,7\,A \cdot \frac{D}{v} \qquad (1)$$

où v représente la valence du cation compensateur. Dans cette relation Q, A et D sont exprimés respectivement en p. 100 d'argile déshydratée hydroxylée, kcal/mole (Basolo et Pearson, 1960) et eq kg^{-1}.

IV. — Discussion et interprétation des résultats

On a déjà signalé que les conditions expérimentales sont telles que l'on a toujours obtenu, initialement, un complexe montmorillonite-éthanediol à deux couches ($d_{001} \neq 17$ Å avec un diagramme de diffraction rationnel sur six ordres). Il s'ensuit que l'aire des surfaces accessibles à l'éthanediol reste constante quel que soit le traitement imposé au minéral, notamment la rétrogradation du lithium. C'est à ce niveau que deux hypothèses peuvent être faites pour expliquer la variation des quantités d'éthanediol au contact des surfaces :

1) le taux d'occupation des surfaces varie alors que l'encombrement moléculaire reste constant ;

2) l'encombrement moléculaire varie alors que le taux d'occupation des surfaces reste constant.

On va montrer que les principaux résultats dont on dispose sont en faveur de la deuxième hypothèse, en se rappelant que l'on peut distinguer, comme pour l'eau, des molécules de solvatation des cations et de remplissage (Dowdy, 1966 ; Dowdy et Mortland, 1968).

L'étude des complexes montmorillonite-eau-diols montre que le remplissage des espaces interfoliaires à partir des cations solvatés est indépendant de la nature du cation mais qu'il est relié uniquement à l'aptitude qu'ont les molécules d'adsorbat à former des liaisons hydrogène intermoléculaires (Chassin, 1975*a*), ce qui est, en particulier, le cas de l'éthanediol. C'est ce résultat qui permet d'ailleurs d'expliquer la forme particulière de la relation (1).

En effet, en l'absence de cations compensateurs, la quantité d'éthanediol au contact des surfaces serait de 0,25 kg kg^{-1} ; valeur très voisine de celle que l'on

peut calculer pour recouvrir une surface de 8.10^5 m^2 kg^{-1} par le glycol à partir des rayons de Van der Waals de cette molécule. Ceci signifie donc qu'un composé polaire est capable de recouvrir un silicate même en l'absence de cations compensateurs. C'est notamment le cas de l'eau adsorbée sur la métahalloysite (Fripiat *et al.*, 1978). La relation (1) indique alors que sur un minéral dioctaédrique, les cations compensateurs de la charge induisent des déformations localisées du film d'autant plus importantes qu'ils sont nombreux (proportionnalité avec D/v) et ont une chaleur d'hydratation grande (proportionnalité avec A). Cette dernière conclusion est conforme aux résultats publiés par Calvet (1972) où il est montré que la quantité d'eau perturbée par le cation augmente avec l'énergie d'hydratation de celui-ci.

On peut donc admettre que la variation des quantités d'éthanediol au contact des surfaces en fonction des caractéristiques physicochimiques du minéral traduit l'existence de déformations locales du film adsorbé avec cependant dans tous les cas, un recouvrement complet des surfaces.

V. — Relation entre l'encombrement moléculaire de l'éthanediol adsorbé sur la montmorillonite, la nature du cation compensateur et la capacité d'échange

En supposant que l'aire de la surface totale de la montmorillonite soit de 8.10^5 m^2 kg^{-1}, l'encombrement moléculaire moyen de l'éthanediol adsorbé sur ce silicate est donné par la relation :

$$\sigma_m = \frac{32{,}94.10^{-20}}{1 + 0{,}013\,5\,A\,\frac{D}{v}} \qquad (2)$$

où σ_m est exprimé en m^2 par molécule.

Exemple :

- Montmorillonite Mg^{2+} ($A = 484$ kcal/mole) ; CEC $= 1{,}1$ eq kg^{-1}
  $\sigma_m = 24{,}5.10^{-20}$ m^2/molécule soit $2{,}38.10^6$ m^2 kg^{-1}.
- Montmorillonite Na^+ ($A = 100$ kcal/mole) ; CEC $= 0{,}5$ eq kg^{-1}
  $\sigma_m = 30{,}7.10^{-20}$ m^2/molécule soit $2{,}98.10^6$ m^2 kg^{-1}.

Sur cet exemple, l'encombrement moléculaire moyen de l'éthanediol varie donc d'environ 25 p. 100.

VI. — Conclusion

Dans ce travail, on a voulu montrer que la détermination de l'aire de la surface totale des silicates avec l'éthanediol pouvait être entachée d'erreurs importantes si l'on se contentait de prendre un encombrement moléculaire constant, notamment la valeur couramment admise de $3{,}22.10^6$ m^2 kg^{-1} obtenue à partir de la surface projetée de la molécule de glycol. Par exemple, la surface d'une montmorillonite saturée par le magnésium et ayant une CEC de 1,1 eq kg^{-1} sera surestimée d'environ 35 p. 100.

Par contre, les erreurs commises seront beaucoup plus faibles si l'on prend un encombrement moléculaire donné par la formule (2), bien qu'elle n'ait été obtenue que sur la montmorillonite car, on peut penser que les conditions physicochimiques des espaces interfoliaires des smectites s'écarteront peu de celles trouvées sur les divers échantillons étudiés dans ce travail et notamment la densité de charge.

Reçu pour publication en octobre 1978.

Summary

Measurement of specific area of clay minerals by the ethanediol
Experimental procedure and calculation method

We have determined, by the kinetics of desorption, the quantity of glycol near the surfaces of the montmorillonite saturated by different cations and which has variable charge densities.

The quantity of interlayer glycol (Q) is directly related to the heat of hydration of the exchangeable cation (A) and the cationic exchange capacity (D) by :

$$Q = 25 + 0.033\,7.A.\frac{D}{v}$$

where Q is expressed in percent,

D : is expressed in eq kg^{-1}

A : is expressed in Kcal/mole

v : is the valence of the exchangeable cation.

If we suppose that the specific area of montmorillonite is 800 $m^2\,g^{-1}$, the average surface coverep by the glycol molecule adsorbed on the silicate is

$$\sigma_m = \frac{32.94.10^{-20}}{1 + 0{,}013\,5\,A.\frac{D}{v}}$$

where σ_m is expressed in m^2 per molecule.

The linear relationship existing between the adsorbed quantity of diol and the properties of clay will be the results of the existence of two surfaces on which the order of molecules depends upon the cation or the molecular properties.

Zusammenfassung

Messung des Flachenraums der ganzen Flache von Ton mit Aethandiol
Experimentelles Protokoll und Rechnungsmethode

Wir haben aus der Desorptionskinetik die Menge von Aethandiol in Verbindung mit Montmorilloniteflächen bestimmt, die wechselnde Beschickungen haben und die durch verschiedene Kationen gesättigt sind.

Die Menge von Aethandiol zwischen den Blättchen (Q) ist mit der Hydrierungswärme des Kations (A) und der Austauschkapazität des Silikats (D) durch die Formel

$$Q = 25 + 0{,}033\,7\ A.\frac{D}{v}$$

unmittelbar verbunden, worin Q in p. 100, D in $eqKg^{-1}$, A in Kcal/mole wiedergegeben sind.

v : Valenz des austauschbaren Kations.

Wenn man annimmt dass die spezifische Fläche der Montmorillonite 800 $m^2\,g^{-1}$ ist, gleicht der Molekülsraumbedarf des adsorbierten Aethandiols

$$\sigma_m = \frac{32{,}94.10^{-20}}{1 + 0{,}013\,5\,A.\frac{D}{v}}$$

worin σ_m ist in m^2/Molekül wiedergegeben.

Die lineare Beziehung zwischen der Menge von adsorbiertem Aethandiol und der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Tons geht aus dem Bestehen von zwei Flächen hervor, wo die Anordnung des Adsorbats entweder von dem Kation oder von den Moleküleigenschaften abhängt.

РЕЗЮМЕ

Измерение величины общей поверхности глин при помощи этан-диола. Протокол эксперимента и методика исчисления.

П. ШАССЕН, БРИГИТТА ЛЕ БЕРР.

С помощью кинетики десорбции определялось количество этан-диола в контакте с площадями поверхности монтмориллонитов, носивших раличные заряды и насыщенных разными катионами.

Количество меж-пластового этан-диола (Q) прямо связано с теплом оводнения катиона (A) и емкостью обмена силиката (D) при помощи формулы :

$$Q = 25 + 0{,}033\,7 \cdot A \cdot \frac{D}{v}$$

в которой Q — выражено в процентах ; D — в eq kg^{-1}, и A — в kcal/mole ; v — является валентностью обменного катиона.

Если предположить что специфическая поверхность монтмориллонита равна 800 $m^2\ g^{-1}$ то молекулярный об'ем адсорбированного этан-диола будет равняться

$$\sigma_m = \frac{32{,}94 \cdot 10^{-20}}{1 + 0{,}013\,5\,A \cdot \frac{D}{v}}$$

где σ выражается в m^2 на молекулу.

Линейное отношение существующее между количеством адсорбированного этан-диола и физико-химическими свойствами глины вытекает из существования двух поверхностей, в которых размещение адсорбированного вещества зависит или от катиона, или от свойств молекулы.

Références bibliographiques

BASOLO F., PEARSON R. G., 1960. *Mechanisms of inorganic reactions*. J. Willey, 442 p.

CALVET R., 1972. *Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs*. Thèse Fac. Sci. Paris.

CHASSIN P., 1975*a*. *Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite-diols*. Thèse Fac. Sci. Paris.

CHASSIN P., 1975*b*. Signification de la mesure de l'aire des surfaces totales des argiles avec l'éthane 1,2 diol. *Clays Minerals*, **11**, 23-29.

DOWDY R. H., 1966. *Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces*. Thèse Michigan State University.

DOWDY R. H., MORTLAND M. M., 1968. Alcohol water interactions on montmorillonite surfaces. II Ethylèneglycol. *Soil Sci.*, **105**, 36-48.

ELTANTAWY I. M., REYNOLDS P. W., 1974. Ethyleneglycol sorption by homoionic montmorillonite. *J. Soil Sci.*, **25** (1), 99-110.

FRIPIAT J. J., LETELLIER, CRUZ M. B., 1978. Une monocouche d'eau idéale : l'halloysite hydratée. *Réunion Groupe français Argiles* ; Paris, 21.3.78 (à paraître).

HENIN S., CHAUSSIDON J., CALVET R., 1969. Surface, forme et croissance des minéraux des argiles. *Bull. Groupe Franç. Argiles*, XXI, 31-45.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite. Propriétés diélectriques et structure du film d'eau*. Thèse Fac. Sci. Paris.

PROST R., 1975. *Etude de l'hydratation des argiles : interactions eau-minéral et mécanismes de la rétention de l'eau*. Thèse Fac. Sci. Paris.

REYNOLDS, 1965. An X-Ray Study of an ethyleneglycol montmorillonite complex. *Amer. Min.*, **50**, 990-1001.

Ann. agron., 1978, **29** (4), 319-355.

Étude de l'organisation des argiles calciques Évolution au cours de la dessiccation

D. TESSIER

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Des échantillons de kaolinite, d'illite, de montmorillonite et d'une argile interstratifiée saturés avec du calcium ont été préparés à l'état de pâte et soumis, par paliers successifs, à des pressions allant de pF 1,0 à pF 6,5.

A chaque contrainte, l'orientation des particules ainsi que l'épaisseur apparente des feuillets ont été mesurées grâce à la diffraction des rayons X. En outre, les observations en microscopie à balayage ont permis de préciser la constitution des particules argileuses au sein des divers matériaux étudiés.

Il ressort de ce travail que l'organisation des argiles met en œuvre des particules dont la constitution est différente suivant la nature de l'argile. Dans la kaolinite, il s'agit de particules primaires ; pour les autres argiles, on a affaire à des associations plus ou moins complexes : ce sont, soit des agrégats de particules primaires dans l'illite et l'argile interstratifiée, soit des associations de particules à développement latéral très important ($> 2\,\mu$), dans la montmorillonite.

Pour chaque cas étudié, nos résultats montrent que les particules mises en évidence jouent au cours du retrait un rôle stérique prépondérant et qu'elles peuvent ainsi être considérées comme de véritables unités morphologiques. Cela nous conduit à concevoir le retrait des argiles comme un phénomène essentiellement interparticulaire, qui dépend largement de paramètres stériques (taille, forme) et de l'association des particules.

De ce point de vue la montmorillonite ne se différencie pas des autres argiles, le retrait fait seulement intervenir un réseau solide plus lâche qui paraît de ce fait plus déformable.

Introduction

Considéré du point de vue physique, le sol est constitué par un ensemble de particules de taille variable et dont la distribution dimensionnelle va des graviers 0,5-2 mm), aux sables (50-500 μ), aux limons (2-50 μ) et enfin aux argiles ($< 2\,\mu$).

L'association de ces particules de différente nature en proportions variables confère au sol des propriétés physiques qui se manifestent sur le terrain, à l'examen des profils pédologique ou cultural, par le développement d'un état structural.

Pour caractériser cet état à côté de l'observation morphologique détaillée, nous avons à notre disposition plusieurs méthodes d'études globales qui permettent de définir des paramètres physiques propres au sol ; ce sont notamment la teneur en eau, la densité apparente et la porosité. Ces paramètres nous apportent indéniablement des informations intéressantes, en ce qui concerne les caractéristiques des systèmes poreux. Toutefois, ceux-ci étant établis sur des matériaux granulométri-

quement complexes et de nature différente, ne permettent pas d'aborder dans le détail la mode d'arrangement des grains constitutifs et en particulier celui des particules argileuses.

C'est donc sur ces dernières que nous avons décidé de porter plus spécialement notre effort.

Aborder les questions d'organisation propre aux argiles présente au départ un certain nombre de difficultés. La première tient à la complexité du sol ; en effet, outre que le sol est composé de particules de nature et de taille différentes, son organisation résulte aussi de sa genèse et de son histoire pédologique. Aussi, pour s'affranchir de la complexité du système poreux sol et pour éviter les effets d'interaction existant avec des particules plus grossières, nous avons retenu dans cette étude des modèles *simples* constitués d'*argiles aussi pures que possible*. Ces argiles étant extraites d'échantillons naturels, nous avons donc supprimé en premier lieu l'organisation préexistante consécutive à l'héritage pédologique ou géologique. Puis, après avoir rendu les suspensions d'argiles homoïoniques, celles-ci ont été amenées par paliers successifs à des teneurs en eau de plus en plus faibles ; chaque palier correspond à un état de contrainte déterminé qui est de ce fait comparable d'une argile à l'autre. Le but final de l'opération consistait en définitive à *suivre la réagrégation contrôlée des particules sous l'effet de la dessiccation*.

Il faut indiquer ici qu'une telle conception « historique » des essais impliquait le contrôle de l'organisation des matériaux pour chaque état de contrainte et à l'équilibre. C'est la raison pour laquelle des méthodes directes ou indirectes, ont été utilisées, relatives en particulier au contrôle du volume externe, à l'étude de l'orientation des particules aux différentes teneurs en eau, et enfin à l'observation directe des particules grâce au microscope électronique à balayage.

C'est à la synthèse des résultats obtenus, en s'appuyant sur les conceptions et les méthodes qui viennent d'être exposées brièvement que cet article est consacré.

I. — Présentation des matériaux et des méthodes

1. — *Choix des matériaux*

Nous avons choisi les matériaux parmi les argiles représentant les types structuraux les plus caractéristiques et en même temps les plus fréquents, à savoir :

- une argile du type 1/1 (kaolinite),
- une argile du type 2/1 non expansible (illite),
- une argile du type 2/1 expansible (smectite).

Toutefois, afin que nos matériaux constituent un modèle dont la validité soit aussi satisfaisante que possible du point de vue statistique, nous avons tenu compte des études de sols qui ont été réalisées systématiquement dans le cadre de l'établissement de la carte pédologique de la France.

Celles-ci indiquent par exemple que les kaolinites des sols sont la plupart du temps des kaolinites très fines, puisque les agrégats dissociés présentent une dimension $< 1\ \mu$. Dans ce cas, les surfaces sont donc importantes et voisines de 20 m^2/g.

De même, nous avons remarqué que les smectites des sols sont souvent assez pures et correspondent à des niveaux géologiques particuliers (Cénomanien par exemple) et que la présence d'illite s'accompagne fréquemment de celle de minéraux qui en sont issus, comme les smectites et vermiculites de transformation.

C'est la raison pour laquelle nous avons été amenés à retenir quatre échantillons :

— une kaolinite provenant du Bassin de Provins (K),

— une illite (du Puy en Velay) (I),

— une montmorillonite (de Sardaigne) (M),

— une argile extraite de l'horizon B d'un sol limoneux du Bassin de Paris et que nous appellerons HB ; ceci pour cerner de plus près le comportement des argiles en mélange.

2. — *Caractères généraux des minéraux étudiés*

Les courbes d'analyse thermique différentielle et d'analyse thermopondérale relatives aux quatre argiles retenues sont regroupées dans les figures 1 et 2, les capacités d'échange en cations et les données sur les surfaces dans le tableau 1.

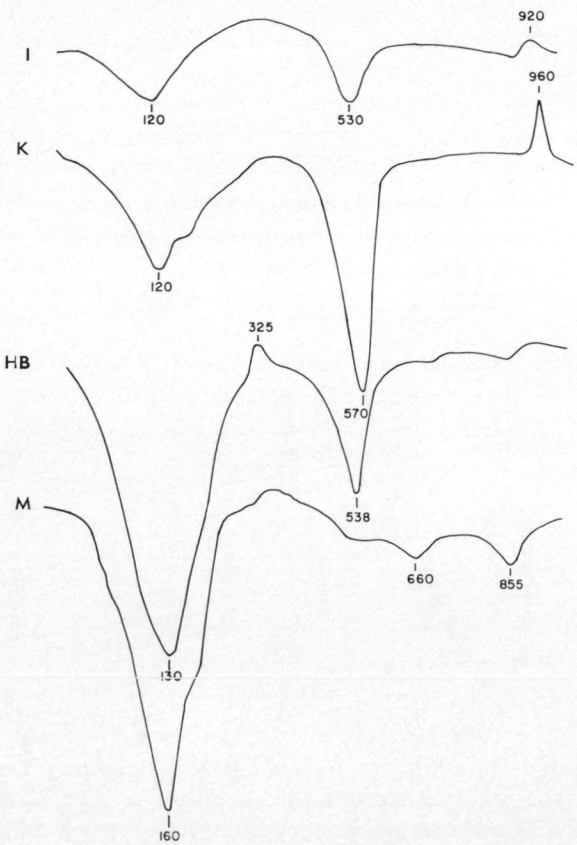


FIG. 1. — *Courbes d'analyse thermique différentielle relatives aux quatre argiles.*
Differential thermal curves of the four clay samples.

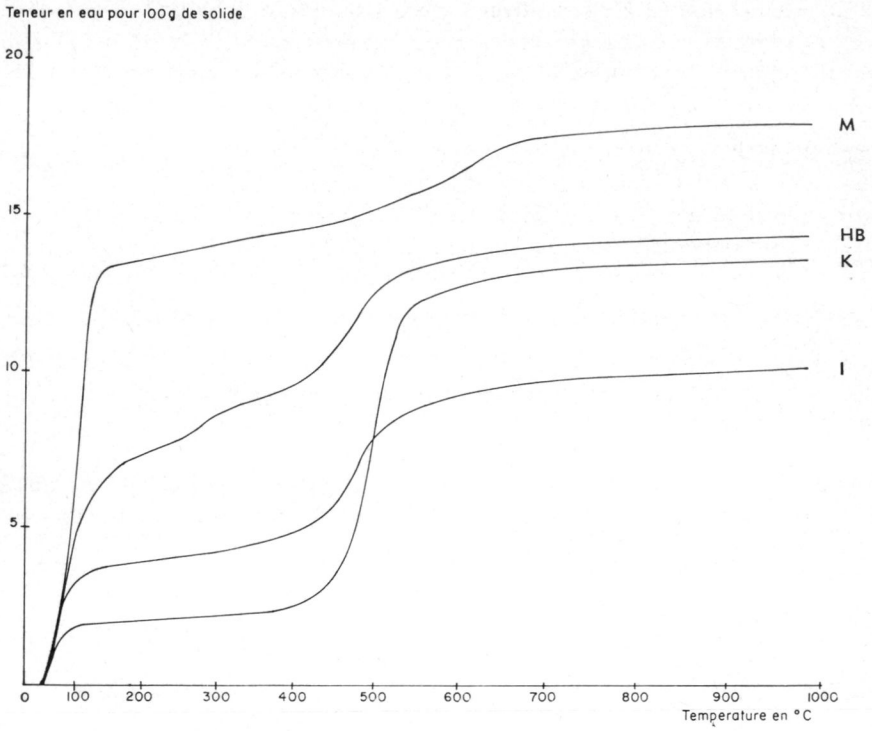


FIG. 2. — *Courbes d'analyse thermopondérale relatives aux quatre argiles.*
Dehydration-weigth-loss curves of the four clay samples.

TABLEAU 1

Données sur les surfaces des argiles ($m^2\ g^{-1}$) *et sur la capacité d'échange en cations* (me 100 g^{-1})
Specific surface area ($m^2\ g^{-1}$) *and base exchange capacity* (me 100 g^{-1}) *of the clay samples*

	Montmorillonite	Horizon B	Illite	Kaolinite
Surface totale	813	367	130	63
Surface interne	766	249	—	—
Surface externe	58	118	130	63
Capacité d'échange en cations .	82	53	30	30

a) *kaolinite.*

L'étude du minéral en diffraction des rayons X indique qu'il s'agit d'une kaolinite très pure du type fire clay. Le désordre apparaît surtout au niveau des deux raies $1\bar{1}0$ et $1\bar{1}1$, qui se trouvent confondues à l'intérieur d'une bande diffuse allant de 4,45 Å à 4,18 Å (fig. 3). Du point de vue des rayons X, ce matériau est en tout point identique à celui décrit par Fleurance et Nicolas (1964). Sa capacité d'échange

et sa surface spécifique étant relativement importantes, il s'agit vraisemblablement d'une argile, dont la taille des particules est *très fine*.

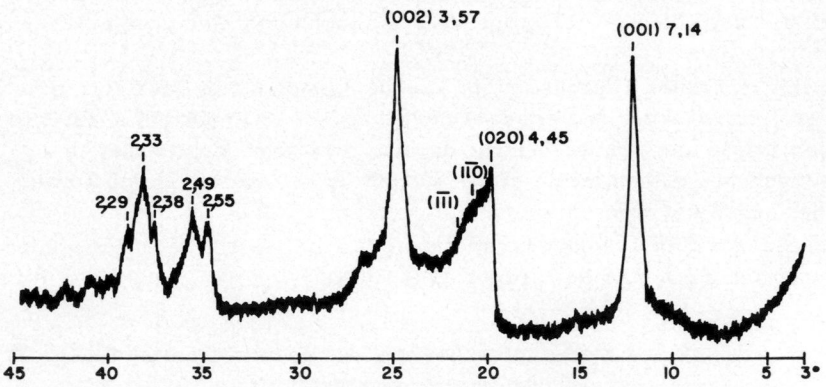


FIG. 3. — *Diagramme de poudre réalisé sur la kaolinite de Provins et montrant le désordre dans l'empilement des feuillets.*

X ray powder diagram of Provins Kaolinite showing the desorder in the layers organization.

b) *illite.*

Cette argile provient du gisement du Puy en Velay dont l'étude a été réalisée par Gabis (1958). La fraction $< 2\ \mu$ que nous avons extraite, rendue calcique, présente la formule structurale suivante :

$$Si_{3,48}Al_{0,52}O_{10}(Al_{1,22}Ti_{0,04}Fe^{3+}_{0,31})\ (Fe^{2+}_{0,03}Mg_{0,38}Mn_{0,07})\ (OH)_2\ Ca_{0,06}K_{0,66}Na_{0,03}\ .$$

c) *montmorillonite.*

Les spectres de rayons X obtenus à partir de cette argile révèlent que celle-ci est pure et ne contient ni minéraux micacés, ni kaolinite. Il s'agit d'une smectite classique, type montmorillonite de Camp Bertaux.

d) *argile HB.*

L'ensemble des méthodes physiques et chimiques utilisées pour les déterminations minéralogiques nous ont permis d'aboutir à la composition suivante :

— 60-65 p. 100 de phyllites 2/1 dont,
  - 35-40 p. 100 de minéraux expansibles (smectites 2/3-vermiculite 1/3),
  - 25 p. 100 d'illite ;
— 25 p. 100 de kaolinite ;
— 10 p. 100 d'oxydes et d'hydroxydes de fer extraits par la méthode De Endredy.

3. — *Préparation des argiles en vue de l'étude du retrait*

Les quatre argiles retenues sont issues du milieu naturel et renferment de ce fait un certain nombre d'impuretés. Lorsque ceci s'est avéré nécessaire, nous avons dissous les carbonates avec l'acide chlorhydrique en maintenant le pH au-dessus de 3,5, puis la matière organique à l'aide d'un traitement à l'eau oxygénée électro.

Ceci étant, l'argile a été saturée avec du sodium, avant d'être dispersée par agitation mécanique dans une solution amenée à pH 9,0 à l'aide de NaOH. Les prélèvements correspondant à la fraction $< 2\ \mu$ ont été effectués en se référant aux normes de l'analyse granulométrique par sédimentation établies d'après la loi de Stokes.

Après séparation, l'argile a été rendue homoïonique sous forme calcique. A ce sujet, il convient de signaler que le choix du cation est important car, si le comportement hydrique des argiles dépend de leur propriétés structurales, il est connu depuis longtemps qu'une même argile, suivant qu'elle est sodique ou calcique, présente des propriétés différentes.

Nous avons choisi ce cation, car il constitue en général l'élément prédominant des complexes d'échange des argiles dans les sols.

4. — *Caractérisation hydrique des pâtes argileuses et définition du protocole expérimental*

Les argiles étant séparées et rendues homoïoniques, il convient d'indiquer dans quelles conditions celles-ci ont été amenées à des teneurs en eau de plus en plus faibles et quelles ont été les méthodes qui ont été utilisées pour caractériser les matériaux.

Amener progressivement une pâte argileuse à dessication revient en fait à en extraire progressivement de l'eau en lui appliquant une certaine contrainte.

Pour ce type de travail, il importait que le retrait du matériau procède en quelque sorte d'une réagrégation *spontanée* des particules en évitant au maximum l'action directe et brutale d'une contrainte externe de *type mécanique*, celle-ci risquant de laisser une marque indélébile sur l'organisation du matériau. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'appliquer à la pâte argileuse des contraintes physiques croissantes de type interne découlant d'un effet de succion en utilisant, dans un premier temps, l'appareil de Richards, et dans un second temps, les techniques hygroscopiques.

L'utilisation de l'appareil de Richards est basée sur la loi de Jurin-Laplace, qui permet de relier le potentiel capillaire ψ existant au niveau de l'interface air-eau des pores, au rayon r d'un pore équivalent :

$$\psi = \frac{-2\ A \cos \alpha}{r}$$

où : A est la tension superficielle de l'eau,
α l'angle de raccordement du ménisque,
r le rayon du capillaire cylindrique équivalent.

Cette prise en considération du rayon équivalent permet, en soumettant les matériaux à des pressions croissantes, de les comparer les uns aux autres.

Cette méthode a été utilisée jusqu'à un potentiel ψ égal à 25 000 g/cm² *. Au-delà de cette valeur, nous nous sommes référés à la technique hygroscopique.

---

* Dans nos expériences, nous avons utilisé le paramètre logarithmique pF = log ψ défini par Schofield.

TABLEAU 2

Contraintes appliquées aux argiles au cours du protocole expérimental. Domaine des différentes méthodes utilisées

Strains applied to the clay samples during the experimental procedure. Domains of use of the two technics

PF	1	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,50	2,75	3	3,5	4	4,2	4,4	4,8	5,4	5,75	6,2	6,5
Méthode utilisée	Technique de pression : Appareil de Richards													Technique hygroscopique : Tensions de vapeur				
	Plaque poreuse										Membrane cellulosique			Solutions salines saturées			Solution d'acide sulfurique	
Montmorillonite	pF 1 à pF 3 de 0,25 en 0,25 unité pF et pF 3,5										4-4,2-4,4			4,8-5,4-5,75-6,2			6,5	
Kaolinite Illite Argile HB	pF 1 à pF 3,5 de 0,50 en 0,50 unité pF										4-4,2-4,4			4,8-5,4-5,75-6,2			6,5	

On sait en effet que le potentiel de l'eau au sein d'un corps poreux peut s'exprimer de différentes façons. Ainsi, il a été montré qu'on peut écrire :

$$\psi = \frac{RT}{M} \log \frac{po}{p} = 10{,}83\ T \log \frac{100}{e}$$

où R est la constante des gaz parfaits,
T la température absolue,
M la masse molaire de l'eau,
po la pression maximale de vapeur d'eau,
p la pression réelle,
e l'humidité relative.

Dans ces conditions, le fait de laisser un échantillon dans une enceinte à une humidité relative donnée, revient à lui appliquer un potentiel ψ.

Le domaine d'utilisation des deux méthodes, ainsi que les modalités d'application aux différentes argiles figure dans le tableau 2. Pour préparer les échantillons, la pâte argileuse de départ a d'abord été homogénéïsée, puis tous les anneaux de Richards ont été remplis avec une seringue. Ainsi, la totalité des échantillons a été soumise aux états de contrainte successifs lorsqu'un équilibre est réalisé, nous avons prélevé à chaque stade la quantité nécessaire à l'étude des matériaux à l'aide des différentes méthodes.

5. — *Méthodes d'étude des matériaux*

a) *Méthodes d'étude des caractéristiques globales et externes.*

L'étude du retrait des matériaux nous a conduit à amener ceux-ci de proche en proche depuis des teneurs en eau élevées jusqu'à des teneurs en eau pratiquement nulles. Aussi, le passage d'un état de dessiccation à un autre se manifeste-t-il par une diminution plus ou moins importante du volume.

Pour mesurer le volume apparent de nos échantillons, nous avons utilisé la méthode préconisée par Monnier *et al.* (1973) qui consiste à mesurer le volume apparent d'un petit agrégat de sol à partir de la poussée hydrostatique provoquée par l'échantillon dans du pétrole.

Cette méthode est adaptée à l'étude d'échantillons secs et humides. En pesant l'échantillon avant de mesurer le volume et en déterminant en fin d'opération le poids sec, nous pouvons calculer la teneur en eau sur un même spécimen. Enfin, connaissant la densité réelle du matériau, nous sommes en mesure de préciser la part respective des fluides, air et eau, au sein du matériau.

Cela dit, ces méthodes ne permettant pas de caractériser l'organisation interne, il faut maintenant envisager cette question.

b) *Méthodes d'étude de l'organisation interne.*

Les méthodes adoptées ont permis, d'une part, d'observer directement l'organisation du matériau et d'autre part, d'obtenir une estimation quantitative de l'orientation des particules au sein de l'échantillon.

Pour visualiser l'organisation du matériau, nous présenterons un ensemble de photos obtenues sur des échantillons amenés à la limite de retrait et ayant par conséquent, subi l'histoire hydrique *complète* depuis pF 1 jusqu'à pF 6,5.

Pour caractériser l'état d'organisation interne au cours du retrait, nous avons mis au point une technique, basée sur la diffraction des rayons X, qui peut être utilisée sur des échantillons humides (Tessier, 1978).

II. — Comportement des matériaux argileux et évolution de l'organisation au cours de la dessiccation

Nous présenterons tout d'abord les résultats obtenus avec les méthodes globales et externes, après quoi nous aborderons les questions relatives à l'organisation. Indiquons d'ailleurs que les différentes données chiffrées se rapportant aux composants du volume pour les quatre argiles ont été rassemblées dans l'annexe, que l'on trouvera à la fin du présent article.

1. — *Courbes de retrait relatives aux quatre échantillons*

Afin de comparer les matériaux entre eux, nous avons regroupé dans la figure 4

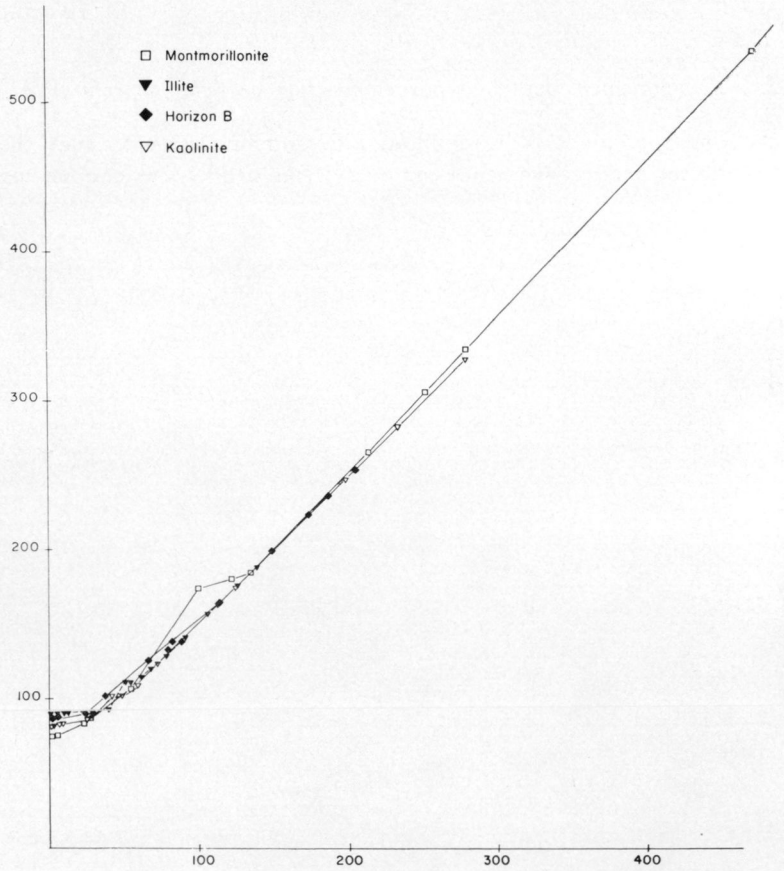


FIG. 4. — *Courbes de retrait relatives aux quatre matériaux.*

Shrinkage curves of the four clay samples.

les courbes de retrait relatives aux quatre matériaux. Les résultats ont été exprimés en cm^3 pour 100 cm^3 de solide.

Un examen rapide du graphique montre que d'une argile à l'autre, et aux différentes teneurs en eau, le comportement reste grosso modo similaire.

Si on regarde toutefois plus en détail, on constate d'abord, pour les teneurs en eau supérieures à 250 cm^3 d'eau par 100 g de solide (environ 700 p. 100 de teneur en eau volumique), que tous les matériaux peuvent être considérés comme saturés. Cela signifie que dans cette portion de la courbe, l'eau occupe entièrement la porosité et que son départ est compensé par une diminution quasi identique du volume apparent.

En revanche, dans une deuxième phase et au voisinage de 200 p. 100 d'eau volumique, la diminution du volume apparent tend à devenir inférieur au volume d'eau extrait : une certaine quantité d'air entre donc dans les échantillons. Toutefois, il faut atteindre 60 cm^3 d'eau par g de solide pour que le volume de l'illite, de la kaolinite et de l'argile HB devienne à peu près stable. C'est ce que beaucoup d'auteurs ont appelé la « limite de retrait ».

Notons cependant que pour la montmorillonite, cette limite n'apparaît pas véritablement.

2. — *Comportement des matériaux en fonction de l'état de contrainte*

Nous avons appliqué aux échantillons une gamme de contraintes croissante de façon à expulser progressivement l'eau du système argileux. A chaque contrainte

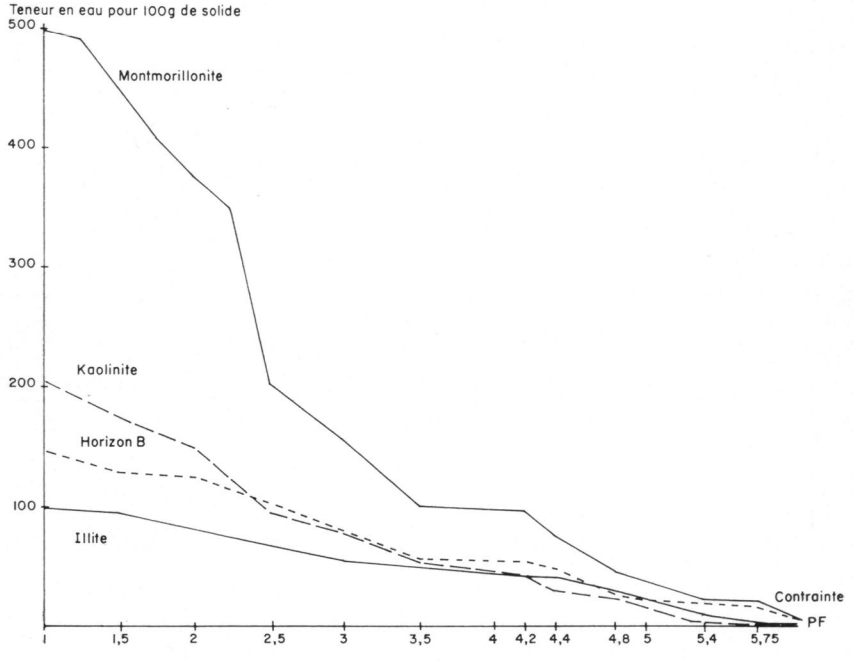


FIG. 5. — *Courbes contrainte teneur en eau relatives aux quatre argiles.*

Strain-water content curves of the samples.

et à l'équilibre, les quantités d'eau contenues dans les différents matériaux peuvent être comparées (fig. 5).

Notons d'abord qu'à pF 1, la montmorillonite se différencie nettement des autres argiles, puisque nous avons respectivement 500 p. 100 dans la montmorillonite, 208 p. 100 dans la kaolinite, 98 p. 100 dans l'illite et 145 p. 100 dans l'argile HB. Ce comportement distinct de la montmorillonite se poursuit d'ailleurs jusqu'à pF 4,2, puisqu'à ce pF nous avons encore *deux fois plus* d'eau que dans les autres argiles.

Remarquons ensuite que toutes les argiles laissent échapper leur eau dans une gamme de contraintes restreinte et essentiellement entre pF 2 et 2,5 d'une part, et entre pF 4,2 et 4,8 d'autre part.

Ces résultats, bien que globaux, permettent déjà de formuler un certain nombre d'hypothèses ayant trait à l'organisation du matériau et à son évolution. Ainsi, il

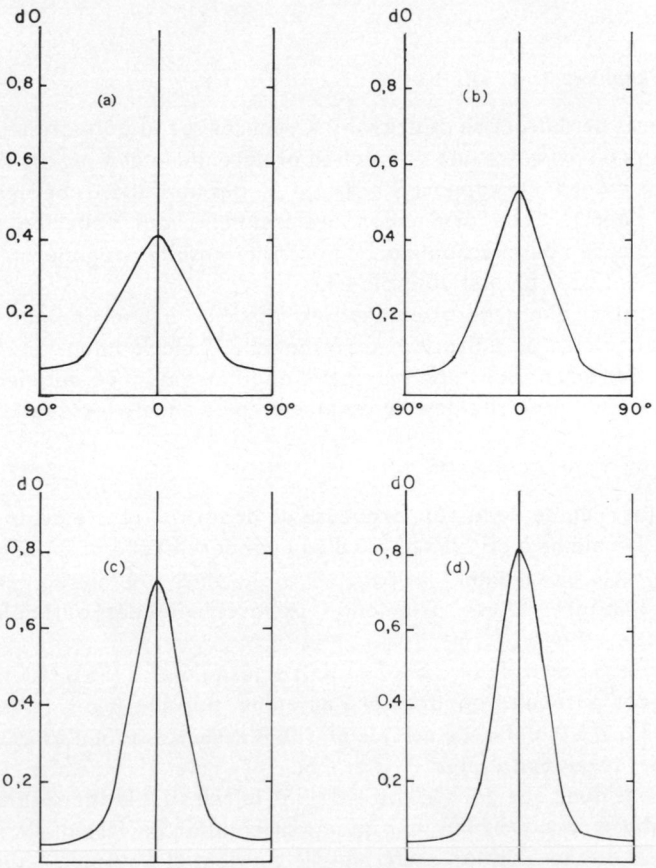


FIG. 6. — *Spectres de diffraction des rayons X réalisés sur la kaolinite à différents* pF :
(*a*) pF 2, 149 p. 100 d'eau, R = 6,1 ; (*b*) pF 3,80 p. 100 d'eau, R = 9 ;
(*c*) pF 4, 44 p. 100 d'eau, R = 12,2 ; (*d*) pF 4,4, 31 p. 100 d'eau, R = 20.

X-ray diffraction patterns obtained from kaolinite at different pF :
(*a*) pF = 2, water content = 149 p. 100, R = 6,1 ;
(*b*) pF = 3, water content = 80 p. 100, R = 9 ;
(*c*) pF = 4, water content = 44 p. 100, R = 12,2 ;
(*d*) pF = 4,4, water content = 31 p. 100, R = 20.

est raisonnable de penser que la montmorillonite, du fait qu'elle est plus hydratée que les autres argiles, possède un système poreux de nature différente.

De même, nous pouvons prévoir que le phénomène de retrait s'accompagne d'un changement dans l'organisation du système poreux. Mais ceci demande à être vérifié et contrôlé en se référant aux méthodes d'étude de l'organisation interne.

3. — *Utilisation de la technique d'étude de l'orientation*

Cette méthode nous permet de suivre l'évolution de l'orientation au cours du retrait. Dans le meilleur des cas, elle a pu même être employée depuis le stade pâte (au moment de la confection des gâteaux d'argile) jusqu'à pF 4,8.

Afin de faciliter la présentation des résultats, nous examinerons chaque minéral pris isolément.

a) *Cas de la kaolinite* (fig. 6).

Ces spectres de diffraction des rayons X réalisés sur la pâte argileuse de départ, mettent toujours en évidence une orientation préférentielle et à pF 2 (149 p. 100 d'eau pondérale) par exemple le rapport $R = I_{max}/I_{min}$ des intensités repérées sur l'anneau choisi ([1]) est de 6,1. Cette orientation préférentielle, qui s'effectue parallèlement au plan de base de l'échantillon, s'accroît ensuite régulièrement, puisque $R = 9{,}0$ à pF 3, 12,2 à pF 4 et 20 à pF 4,4.

Signalons aussi que cette orientation est associée à une limitation progressive du domaine angulaire de diffraction préférentielle. Cela indique que le nombre de particules qui diffractent dans une fourchette angulaire donnée augmente progressivement et que cette fourchette devient de plus en plus étroite lorsque le pF croît.

b) *Cas de l'illite et de l'argile HB.*

• Sur l'illite, l'étude de la pâte argileuse de départ ne révèle aucune orientation préférentielle. De même à pF 1 (98 p. 100 d'eau pondérale) et à pF 2 (89 p. 100) (fig. 7), l'organisation reste globalement isotrope. Ainsi, la phase initiale du retrait de l'illite n'est pas accompagnée d'une orientation préférentielle des particules détectable avec la méthode utilisée.

En revanche, à partir de pF 2,5 (67 p. 100) et jusqu'à pF 3 (56 p. 100), l'orientation préférentielle des particules apparaît et s'accentue, puisque R prend respectivement les valeurs de 3,6 et 5,0. Enfin, au delà de pF 3,0, R reste constant, l'orientation globale constatée ne se développant plus.

Nous voyons donc que dans le cas de l'illite, le retrait fait apparaître trois phases distinctes ; d'abord celui-ci se fait sans qu'une orientation préférentielle des particules apparaisse, puis une orientation préférentielle survient et s'amplifie ; enfin, le retrait se poursuit sans qu'une augmentation de cette orientation puisse être constatée.

• Sur l'argile HB, les spectres de rayons X indiquent que l'évolution de l'orientation se fait suivant des modalités comparables à celles de l'illite et dans des domaines de contrainte similaires.

([1]) Cf. Tessier, *Ann. agron.* 1978, **29** (2), p. 205.

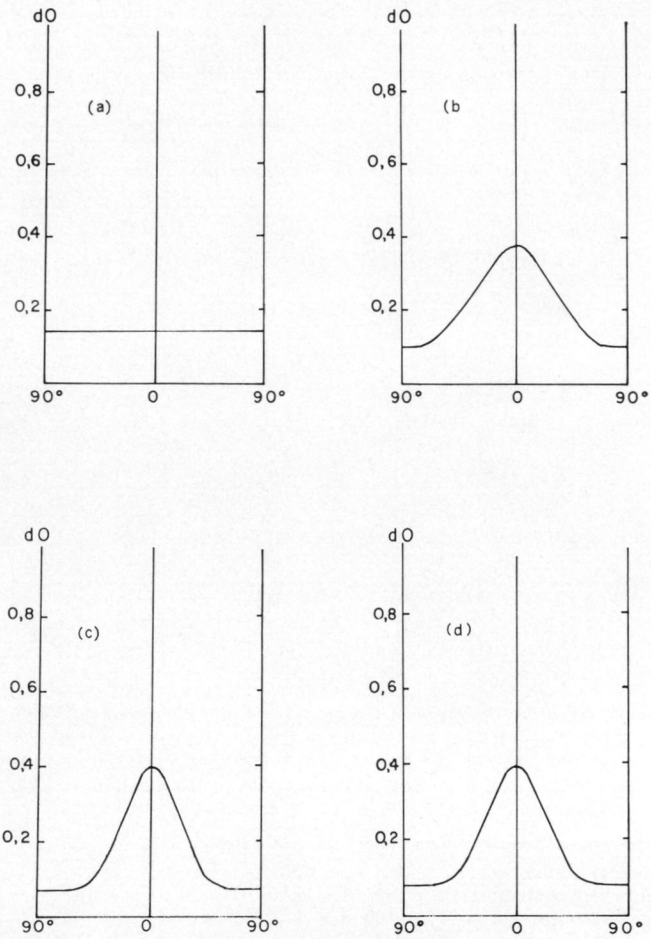


FIG. 7. — *Spectres de diffraction des rayons X réalisés sur l'illite à différents* pF :
(*a*) pF 2,80 p. 100 d'eau, R = 1,0 ; (*b*) pF 2,5, 66 p. 100 d'eau, R = 3,6
(*c*) pF 3,56 p. 100 d'eau, R = 5,0 ; (*d*) pF 3,5, 48,5 p. 100 d'eau, R = 5,0.

X-ray diffraction patterns obtained from illite at different pF :
(*a*) pF = 2, water content = 80 p. 100, R = 1,0 ;
(*b*) pF = 2,5, water content = 66 p. 100, R = 3,6 ;
(*c*) pF = 3, water content = 56 p. 100, R = 5,0 ;
(*d*) pF = 3,5, water content = 48,5 p. 100, R = 5,0.

c) *Cas de la montmorillonite* (fig. 8).

Sur la pâte argileuse de départ, les anneaux de diffraction restent parfaitement homogènes ; il n'existe donc pas à ce stade d'orientation préférentielle.

Ensuite, à pF 1 et à pF 2, les spectres de rayons X révèlent une orientation préférentielle peu marquée, puisque R prend les valeurs de 1,30 à pF 1 et 1,50 à pF 2, tandis que la teneur en eau passe de 498 p. 100 à 370 p. 100.

Puis, à pF 2,25 (348 p. 100) et jusqu'à pF 2,75 (185 p. 100), les courbes présentent une forme particulière comparable à celle de courbes de Gauss tronquées ; toutefois l'orientation reste limitée.

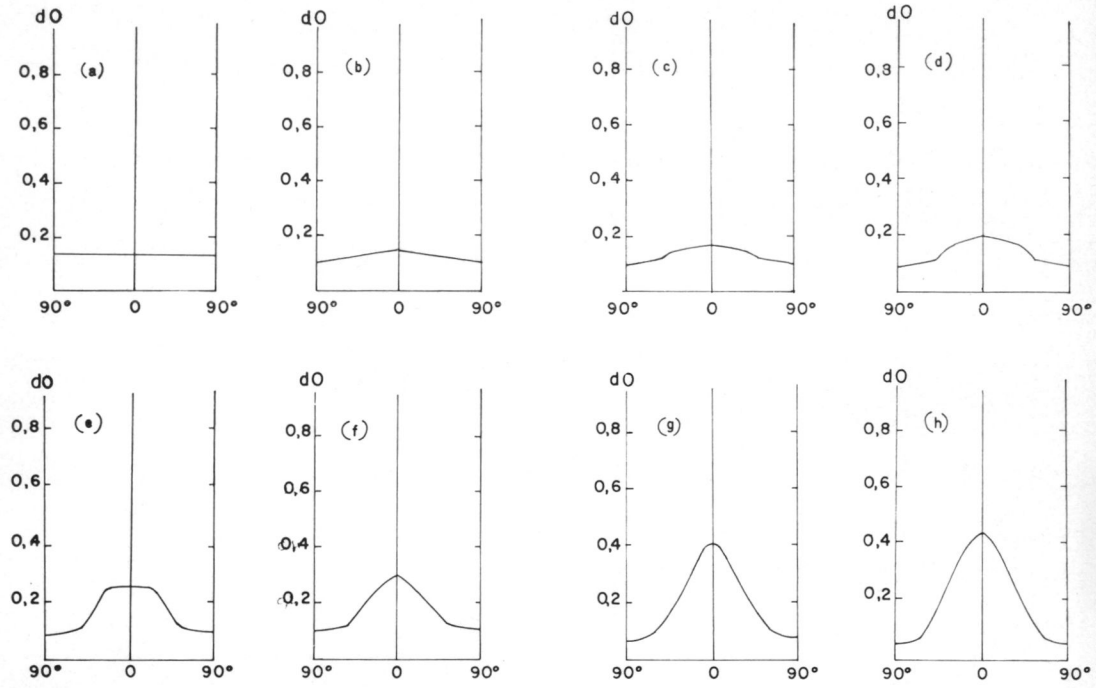


FIG. 8. — *Spectres de diffraction des rayons X réalisés sur la montmorillonite à différents* pF :

(*a*) pF 1, 500 p. 100 d'eau, R = 1,30 ; (*b*) pF 2,0, 370 p. 100 d'eau, R = 1,50 ;
(*c*) pF 2,25, 350 p. 100 d'eau, R = 1,70 ; (*d*) pF 2,5, 206 p. 100 d'eau, R = 2,05 ;
(*e*) pF 2,75, 186 p. 100 d'eau, R = 2,65 ; (*f*) pF 3,0, 158 p. 100 d'eau, R = 2,95 ;
(*g*) pF 3,5, 99 p. 100 d'eau, R = 5,50 ; (*h*) pF 4,0, 95 p. 100 d'eau, R = 6,75.

X-ray diffraction patterns obtained from montmorillonite at different pF :

(*a*) pF = 1, water content = 500 p. 100, R = 1,30 ;
(*b*) pF = 2,0, water content = 370 p. 100, R = 1,50 ;
(*c*) pF = 2,25, water content = 350 p. 100, R = 1,70 ;
(*d*) pF = 2,5, water content = 206 p. 100, R = 2,05 ;
(*e*) pF = 2,75, water content = 186 p. 100, R = 2,65 ;
(*f*) pF = 3,0, water content = 158 p. 100, R = 2,95 ;
(*g*) pF = 3,5, water content = 99 p. 100, R = 5,50 ;
(*h*) pF = 4,0, water content = 95 p. 100, R = 6,75.

Enfin, à partir de pF 3 (157 p. 100 d'eau) et en continuant jusqu'à pF 4,8 (42 p. 100), l'orientation préférentielle devient importante.

Nous voyons donc que la montmorillonite présente au cours du retrait une évolution de l'orientation plus complexe que celle des autres argiles.

Tout se passe comme si, au début de l'expérience l'organisation du matériau restait globalement isotrope ; toutefois le retrait est important. Cette phase initiale est suivie d'un domaine de transition où les particules se répartissent uniformément, selon une fourchette angulaire donnée et de plus en plus restreinte. Enfin, pour les pF $\geqslant$ 3, la courbe de diffraction prend la même allure que celle des autres argiles.

Rappelons aussi qu'à côté des mesures d'orientation, la méthode basée sur la diffraction des rayons X apporte des renseignements complémentaires relatifs à l'épaisseur apparente des feuillets. Pour des teneurs en eau $\leqslant$ 73 p. 100 (pF $\leqslant$ 4,4)

d (001) reste toujours très voisin de 20 Å. En revanche, à partir de pF 4,8 (41,6 p. 100) d'eau et 95 p. 100 d'humidité relative, d (001) tombe à 15,5 Å : le passage de pF 4,4 à pF 4,8 provoque ainsi l'expulsion d'une partie de l'eau interfoliaire.

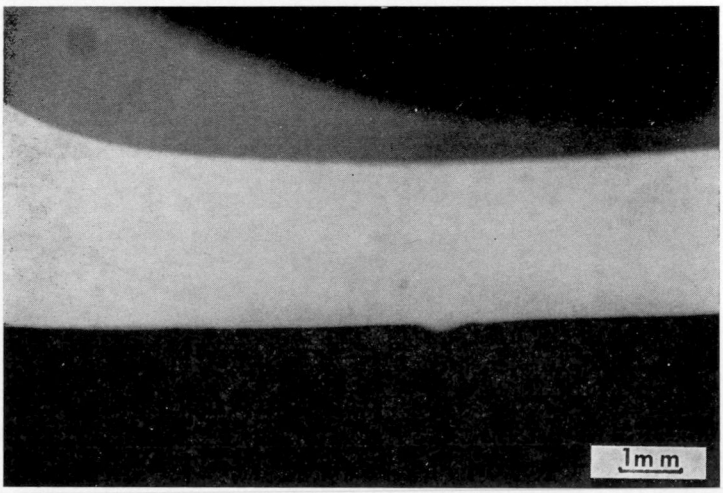
4. — *Données sur l'organisation interne des matériaux*

Nous avons appliqué les méthodes d'observation aux échantillons ayant subt toutes les phases du retrait. Pour les faibles grossissements ($G \leqslant 50$), nous avons utilisé la loupe binoculaire. Celle-ci renseigne sur les organisations dont les éléments possèdent une taille qui va de 0,1 à quelques mm.

Pour les forts grossissements (jusqu'à 50 000), nous nous sommes servis du microscope électronique à balayage (MEB). Cette technique convient parfaitement à l'étude des organisations argileuses. En outre, pour tirer le meilleur parti de ce matériel, les observations ont été réalisées essentiellement en dirigeant le faisceau d'électrons parallèlement ou perpendiculairement au plan de référence (plan de base de l'échantillon) et en appliquant la méthode à des échantillons fracturés.

a) *Cas de la kaolinite Ca.*

L'étude de la tranche d'un échantillon à la loupe binoculaire ne révèle aucune fissure décelable (cliché 1). L'échantillon apparaît sous la forme d'un bloc compact et sans fissure. La cassure pratiquée est nette et franche.

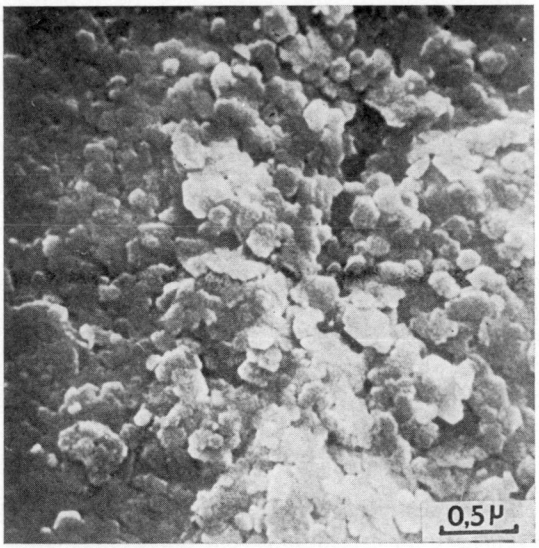


Cliché 1. — *Echantillon de kaolinite ; observation sur la tranche du gâteau mettant en évidence l'absence de porosité fissurale* × 10.

Kaolinite sample : observation of the edge of the slab showing the non occurence of fissural porosity × 10.

L'étude de l'organisation interne au niveau des cristallites a été réalisée dans de bonnes conditions en dirigeant le faisceau d'électrons perpendiculairement au plan d'orientation principale (cliché 2). Les particules, qui participent à l'organisation sont

généralement des monocristallites ou parfois des assemblages de quelques cristallites (trois à quatre au maximum).

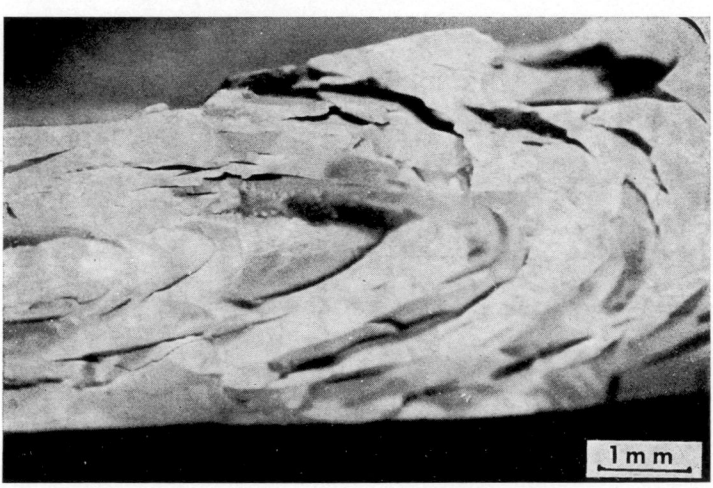


Cliché 2. — *Echantillon de kaolinite ; observation perpendiculaire au plan de base : détails sur la taille, la forme et l'assemblage des cristallites.* MEB × 22 000.

Kaolinite sample : observation perpendicular to the basal plane ; detailed view of the size, shape and arrangment of the crystalline particles. SEM × 22 000.

Le diamètre moyen des cristallites est compris entre 0,2 et 0,3 µ, l'épaisseur évaluée à 200 Å ; le rapport épaisseur/diamètre est donc environ de 1 à 10 à 1 à 20.

La granulométrie du matériau est par conséquent très fine et très resserrée ; aussi les cristallites ressemblent plus à des briques qu'à des cartes à jouer.

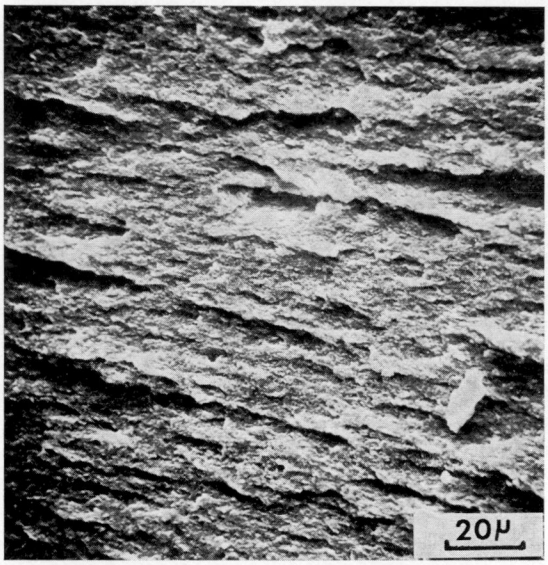


Cliché 3. — *Echantillon d'illite : mise en évidence d'une fissuration concentrique très développée* × 15

Illite sample : view of a set of concentric splits × 15.

b) *Cas de l'illite Ca.*

Nous avons fracturé un échantillon sec, perpendiculairement à son plan de base, afin d'observer la tranche ainsi mise à nue. A l'examen sous la loupe binoculaire (cliché 3) le fait le plus frappant consiste en un développement d'un réseau de fissures. Celles-ci sont concentriques et débouchent en partie sur l'extérieur. Ajoutons que le fait d'avoir fracturé l'échantillon a probablement accru l'ampleur de la fissuration.



Cliché 4. — *Echantillon d'illite : observation de la tranche du gâteau mettant en évidence un litage au niveau microscopique.* MEB × 550.

Illite sample : view of the edge of the slab showing a sheet configuration. SEM × 550.

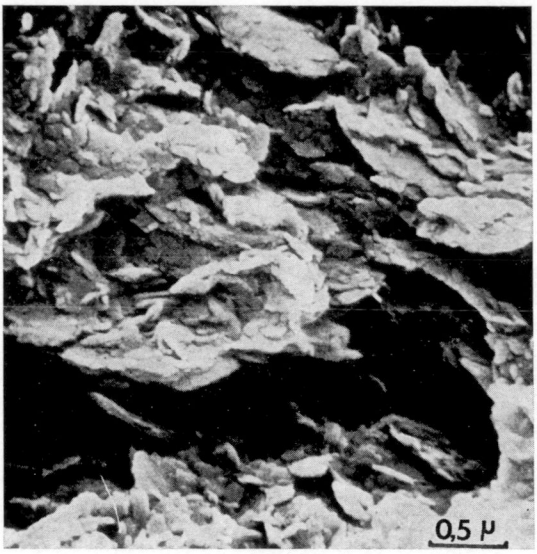
A l'observation au MEB et au grossissement 550 (cliché 4), un litage apparaît qui est parallèle aux fissures de l'échantillon. Ce litage fait penser à une zone de décollement préférentielle qui pourrait être à l'origine de l'apparition des fissures et de la formation des écailles. L'épaisseur de chaque lit oscille autour de 5 à 10 µ.

Enfin, pour visualiser l'organisation élémentaire au niveau des particules, nous avons utilisé les observations correspondantes aux clichés 5 et 6.

Dans le cliché 5, l'arrangement consiste en un enchevêtrement de particules associées plutôt face-face, mais dont les éléments les plus fins occupent les interstices. L'épaisseur maximum de chaque particule a été évaluée à 1 000 Å au centre ; celles-ci paraissent d'ailleurs très hétérogènes.

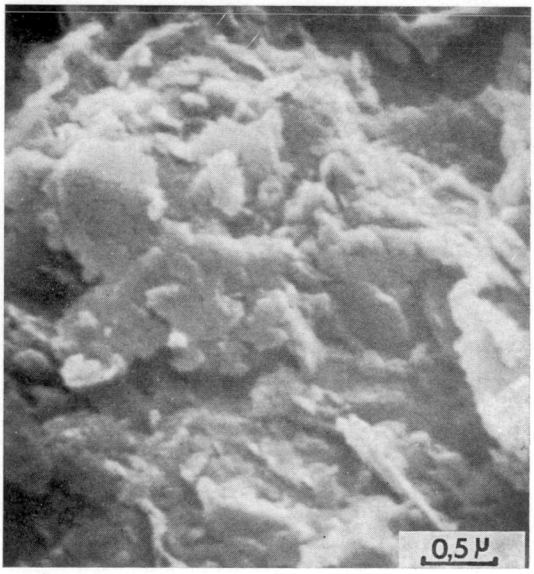
Si nous dirigeons maintenant le faisceau d'électrons perpendiculairement au plan de référence, on voit apparaître des *agrégats* dont le diamètre varie en général de 0,1 à 0,8 µ. Ceux-ci sont constitués de particules plus petites, associées bord à bord et dont la taille est proche de 500 Å.

En conclusion, nous pouvons donc affirmer que l'organisation de l'illite est différente, à tous les niveaux, de celle de la kaolinite.



Cliché 5. — *Echantillon d'illite : observation de la tranche du gâteau, détails sur l'arrangement des particules.* MEB × 22 000.

Illite sample : observation of the edge of the slab ; detailed view of the particles organization. SEM × 22 000



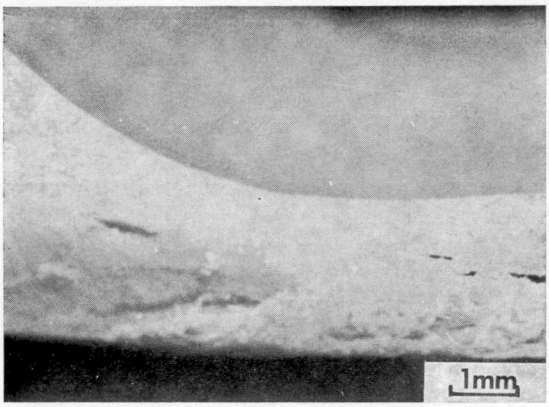
Cliché 6. — *Echantillon d'illite : observation perpendiculaire au plan de base du gâteau. Détails sur la forme, la taille, la constitution des particules.* MEB × 22 000.

Illite sample observed perpendicularly to the basal plane of the slab ; detailed view of the shape, size and constitution of the particles. SEM × 22 000.

c) *Cas de la montmorillonite.*

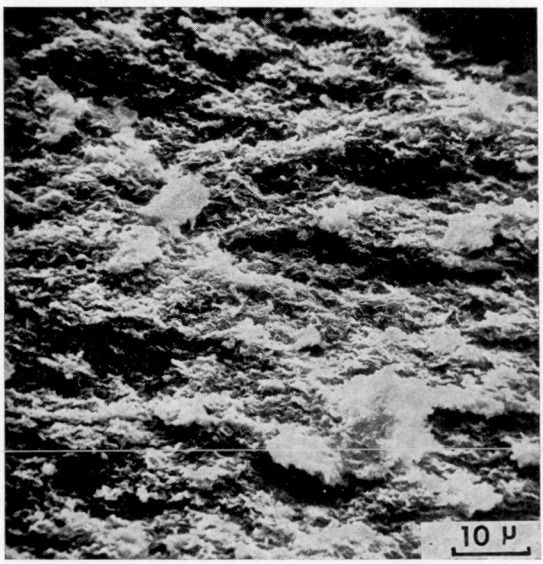
Nous avons d'abord étudié la tranche des gâteaux à la loupe binoculaire (cliché 7). Celle-ci ne permet pas d'identifier une porosité d'origine fissurale.

Ensuite, nous avons observé la même tranche au microscope, d'abord au grossissement 1 100 (cliché 8) ; sur cette photo nous devinons l'assemblage élémentaire,



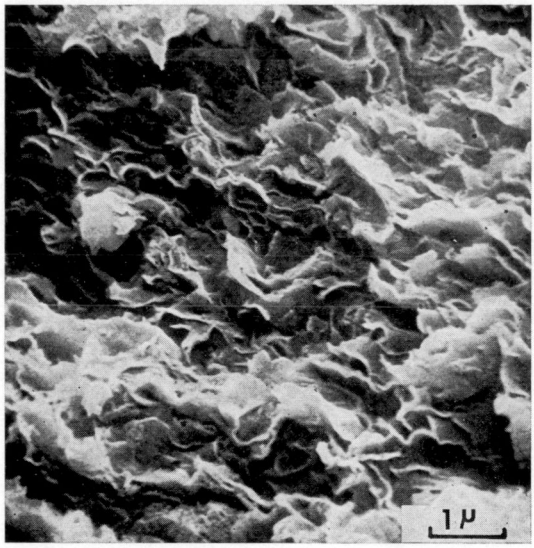
Cliché 7. — *Echantillon de montmorillonite ; observation de la tranche du gâteau.* Loupe binoculaire × 10.

Montmorillonite sample : observation of the edge of the slab. Binocular lens × 10.



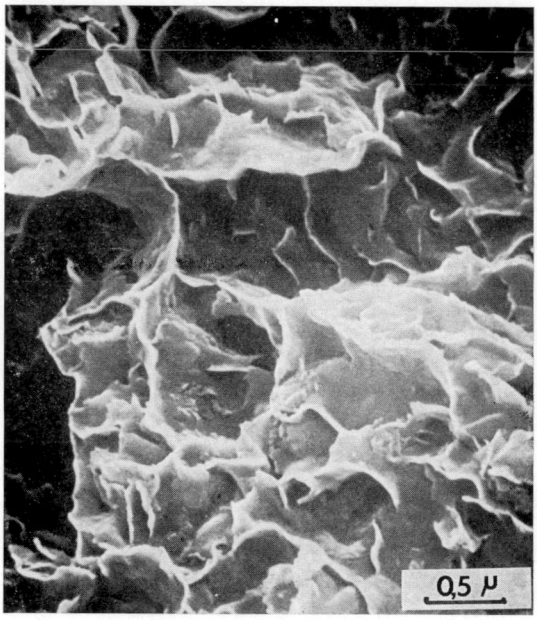
Cliché 8. — *Echantillon de montmorillonite ; observation de la tranche du gâteau.* MEB × 1 100.

Montmorillonite sample : observation of the edge of the slab. SEM × 1 100.



Cliché 9. — *Echantillon de montmorillonite ; observation de la tranche du gâteau.* MEB × 11 000.

Montmorillonite sample : view of the edge of the slab. SEM × 11 000.



Cliché 10. — *Echantillon de montmorillonite ; observation perpendiculaire au plan de base de l'échantillon.* MEB × 22 000.

Montmorillonite sample ; observation perpendicularly to the basal plane of the sample. SEM × 22 000.

mais aucune discontinuité à un autre niveau d'organisation n'apparaît ; ceci confirme ainsi ce que nous avons constaté précédemment.

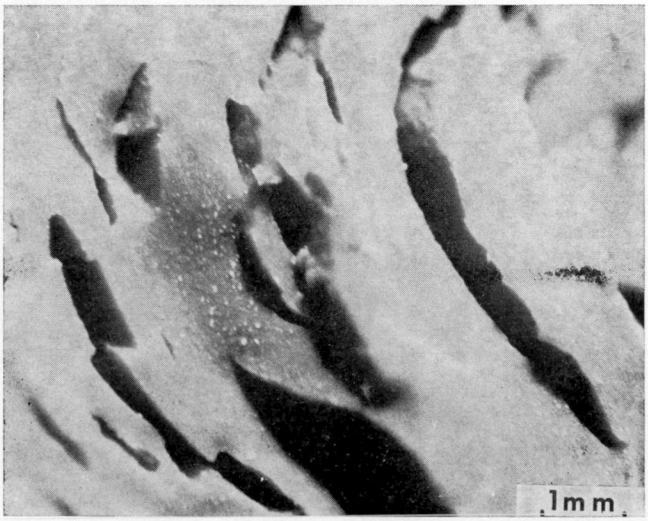
A un plus fort grossissement, les observations effectuées arrivent à rendre compte de l'assemblage élémentaire. Ainsi, le cliché 9 révèle que les particules sont des ensembles texturaux à développement planaire particulièrement important qui ressemblent plus à des *rubans* qu'à des cartes à jouer.

Ces rubans sont très chiffonnés, parfois repliés sur eux-mêmes et s'empilent à la manière des feuilles d'un livre. Si nous essayons de proposer une dimension, nous sommes amenés à donner un diamètre qui dépasse souvent 2 μ. L'épaisseur est difficile à évaluer avec précision au MEB ; mais en se référant aux données de la surface spécifique, on arrive à proposer une valeur voisine de cent Angströms.

Par ailleurs, si nous observons l'échantillon perpendiculairement au plan d'orientation (cliché 10), il est aisé de mettre en évidence des raccordements entre les rubans. Ceux-ci paraissent s'effectuer préférentiellement bord-face et parfois face-face. La plupart de ces associations semblent conservées jusqu'à la phase ultime du retrait. L'organisation fait du reste penser à une sorte de treillis rubanné continu effondré.

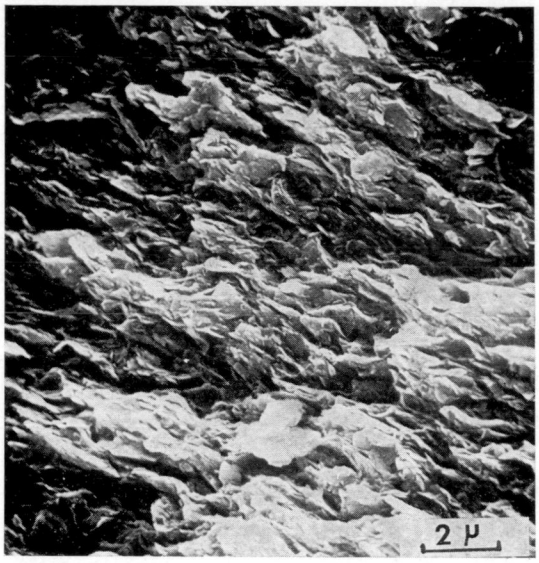
d) *Cas de l'argile HB.*

L'organisation du matériau observé à la loupe binoculaire se révèle très proche de celle que nous avons rencontrée pour les échantillons d'illite. Comme pour cette argile, nous observons ici des fissures concentriques (cliché 11).



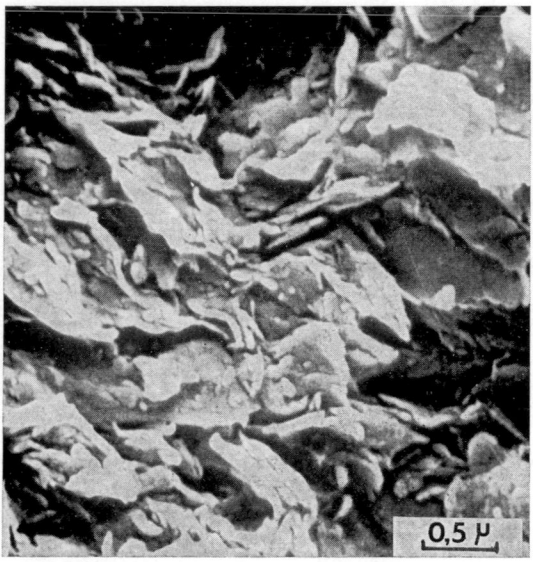
Cliché 11. — *Echantillon d'argile HB : observation de la tranche du gâteau-loupe binoculaire.* × 12.
HB Clay sample : observation of the edge of the slab-binocular lens. × 12.

De même au MEB et au grossissement 5 500, on peut noter l'existence de lits dont l'épaisseur moyenne se situe entre 1 et 2 μ (cliché 12).



Cliché 12. — *Echantillon d'argile HB : observation de la tranche du gâteau mettant en évidence un litage fin.* MEB × 5 500.

HB sample : observation of the edge of the slab showing clearly a thin sheet structure. SEM × 5 500.



Cliché 13. — *Echantillon d'argile HB : observation de la tranche du gâteau. Détails sur la taille et la forme des particules.* MEB × 22 000.

HB sample : observation of the edge of the slab ; detailed view of the size and the shape of the particles. SEM × 22 000.

Enfin, l'étude d'un lit dans le détail indique que l'assemblage est très compact et qu'il est très difficile dans ces conditions de séparer les particules (cliché 13). Néanmoins leur taille a pu être évaluée de 0,3 à 1,5 μ avec une dimension moyenne de 0,6 μ. De plus, ces particules sont de toute évidence des agrégats comparables à ceux que nous avons rencontrés dans le matériau illitique. Ajoutons pour terminer que, malgré la présence de 35 p. 100 de minéraux expansibles dans cette argile, nous ne trouvons pas la morphologie rubannée si caractéristique de la montmorillonite.

5. — *Conclusion*

Nous avons présenté, au cours de cette partie II, les résultats obtenus à l'aide de différentes méthodes d'approche pour quatre matériaux argileux. Cela nous a conduit ainsi à mettre en évidence des ressemblances ou des divergences dans le comportement et l'organisation des divers matériaux. Le tableau 3 regroupe à cet effet l'ensemble des données acquises.

Il en résulte que les teneurs en eau obtenues pour chaque argile et aux différentes contraintes, la taille et la forme des particules vérifiées au MEB, l'évolution de l'orientation au cours du retrait traduisent l'individualisation de corps poreux de nature *différente*, dont l'évolution au cours du retrait se montre spécifique.

La dernière partie sera donc consacrée à une discussion générale relative au comportement et à l'organisation des quatre matériaux.

TABLEAU 3

Données principales sur l'organisation et le comportement des quatre matériaux

Main data concerning the organization and the compartment of the four clay samples

	Montmorillonite	Illite	Argile HB	Kaolinite
Particules observées au MEB	> 2 μ			
— taille	maximum	0,1-0,8 μ (0,4 μ)	0,3-1,5 μ (0,6 μ)	0,2 μ
— épaisseur	quelques centaines d'Å	1 000 Å	1 000 Å	2-300 Å
— Forme	rubans chiffonnés	agrégats	agrégats	plaquettes
pF 1				
— teneur en eau	498 p. 100	98 p. 100	145 p. 100	208 p. 100
— orientation	nulle	nulle	nulle	faible
pF 2,5				
— teneur en eau	206 p. 100	66 p. 100	106 p. 100	93 p. 100
— orientation	limitée	marquée	marquée	importante
pF 4				
— teneur en eau	95 p. 100	44 p. 100	58 p. 100	44 p. 100
— orientation	importante	importante	importante	très importante

III. — Types d'organisation des 4 argiles. Leur évolution avec les conditions expérimentales

1. — *Constitution de la particule argileuse propre à chaque argile Ca*

Sur les quatre argiles que nous avons étudiées, le MEB nous a permis de mettre en évidence des particules de nature différente :

— dans la kaolinite il s'agit de cristallites élémentaires,

— dans la montmorillonite, dans l'illite et l'argile HB, nous avons affaire à des ensembles texturaux plus ou moins complexés.

Pour la montmorillonite les assemblages que nous avons identifiés possèdent une extension bidimensionnelle très importante, mais dont l'épaisseur est limitée. Ceci est d'ailleurs confirmé par les résultats de Blackmore et Miller (1961), Shainberg et Kemper (1966), Banin et Lahav (1968), Van Olphen (1973), qui indiquent que dans la montmorillonite Ca fortement hydratée le nombre de feuillets constituant l'épaisseur de la particule varie de 5 à 15.

En outre, chaque assemblage étant de grande dimension, ($> 2\,\mu$), est donc constitué par un grand nombre de particules primaires accolées bord à bord (fig. 9). Ce fait est d'ailleurs confirmé par Mering et Oberlin (1971).

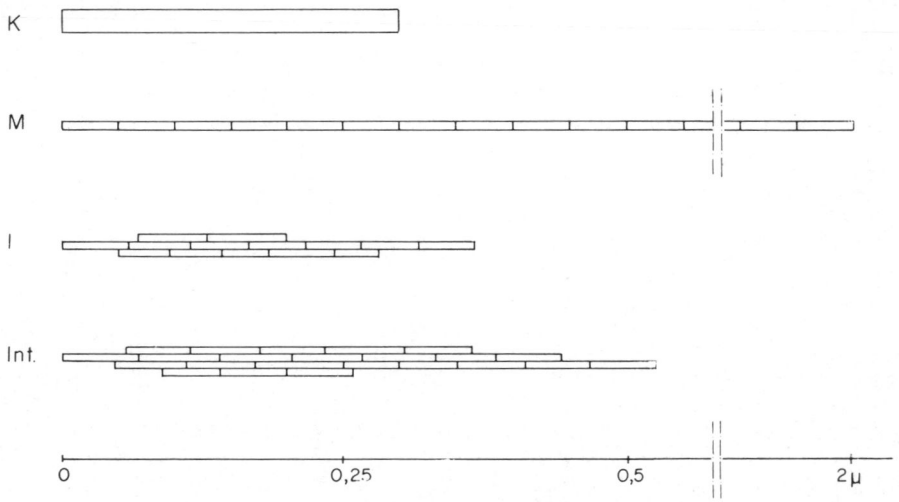


FIG. 9. — *Constitution des unités morphologiques relatives aux quatre argiles.*
Constitution of the morphological units of the four clay samples.

En ce qui concerne l'illite Ca et l'argile HB, nous avons constaté l'existence de particules épaisses (jusqu'à 1 000 Å) ; étant donné la surface spécifique de ces matériaux (130 m^2/g pour l'illite), nous pouvons avoir une certaine idée de l'épaisseur de chaque particule primaire. Celle-ci est évaluée à 70-100 Å pour l'illite c'est-à-dire qu'elle est composée de sept à dix feuillets de diamètre voisinant les 500 Å. Cela

conduit à un arrangement du type bord-bord — face-face des particules primaires (fig. 9) qui serait le même dans l'illite et l'argile HB.

Nous voyons donc que pour les quatre argiles étudiées (fig. 9) ce sont des particules de nature différente, plus ou moins complexes qui jouent le rôle principal dans l'organisation des matériaux. Afin qu'il n'y ait pas de confusion au niveau des termes utilisés, nous proposons celui d'unité morphologique pour décrire cette particule argileuse qui joue le rôle stérique primordial dans l'organisation des matériaux.

Ajoutons que cette prise en compte de l'unité morphologique se révèle particulièrement intéressante, car elle nous amène à un certain nombre de conclusions sur la mise en place et le comportement des matériaux.

Ainsi, dans la kaolinite Ca, la présence d'unités morphologiques composées de cristallites élémentaires, montre que ces mêmes cristallites ne peuvent s'agréger entre eux pour constituer des ensembles plus larges. Dans ce cas la taille des unités morphologiques est commandée par l'intensité de l'opération de dispersion, au moment de la préparation des matériaux.

Dans la montmorillonite nous avons noté que la plus grande partie du retrait se déroule sans modification de l'épaisseur apparente des feuillets. Ce fait est en accord avec les données de Mering (1946), Barshad (1953), Norrish (1954), Emerson (1962) et Quirk (1968) qui montrent que la distance d001 de la montmorillonite Ca ne dépasse jamais 20 Å. Cela signifie que le retrait de la montmorillonite calcique peut être considérée comme étant essentiellement un phénomène interparticulaire et se ramène, comme nous le verrons, au cas des autres argiles.

En ce qui concerne l'illite, le mode de constitution de l'unité morphologique bord-bord — face-face, nous permet d'expliquer que, malgré une granulométrie relativement grossière, la surface spécifique des illites mesurée avec la technique BET est toujours élevée : Grim (1953), Guyot (1969), Sills *et al.* (1973). Cette surface spécifique correspondrait à la surface interparticules primaires. Quant à la surface interunités morphologiques c'est-à-dire la surface directement en contact avec l'eau, son étendue serait beaucoup plus limitée, nous la situons à 20 m^2/g pour notre matériau.

Notons aussi que pour l'illite, la taille des particules évaluée au microscope électronique à balayage se révèle parfaitement en accord avec celle que nous avons vérifiée au microscope à transmission, à partir de l'argile Na dispersée. Cela signifie qu'il n'y a pas de désagrégation ou de réagrégation des unités morphologiques au cours de l'opération de dispersion. Celles-ci apparaissent donc très stables et leur constitution semble dépendre ici de facteurs génétiques.

Enfin, pour l'argile HB, nous avons noté que les unités morphologiques possèdent la morphologie de l'illite. Pourtant cette argile contient 30 à 35 p. 100 de minéraux expansibles du type vermiculite et smectite de transformation tels que les a décrits Robert (1972). Un tel fait est intéressant à noter, car il signifie avant tout que les smectites de transformations et les vermiculites issues de l'évolution de l'illite ne présentent pas une morphologie de tactoïde.

Il est d'ailleurs très probable qu'un tel comportement est lié à l'existence d'une localisation tétraédrique des déficits de charge dans les vermiculites et smectites de transformation et d'un autre côté à la valeur relativement élevée du déficit global par rapport à une montmorillonite vraie. Ces deux considérations joueraient directement sur la stabilité des unités morphologiques ainsi mises en évidence.

2. — *Organisation des unités morphologiques aux fortes teneurs en eau* (pF_1-pF_2) (fig. 10*a*)

La constitution des unités morphologiques propres aux différentes argiles étant précisée, nous allons examiner maintenant comment se fait l'assemblage entre les unités, dans les argiles aux fortes teneurs en eau.

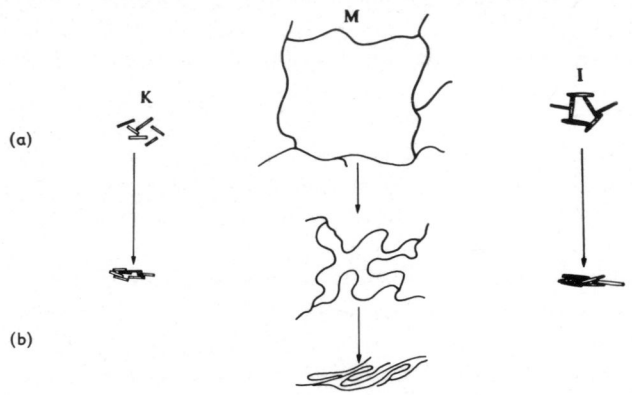


FIG. 10. — Schéma de l'évolution de l'organisation des différentes argiles au cours de la dessiccation
(*a*) fortes teneurs en eau ;
(*b*) évolution au cours du retrait ;

Schematic representation of the evolution of the organization of the different clay minerals in the course of desiccation.
(*a*) high water conter ;
(*b*) evolution during the skrinkage.

— Les résultats que nous avons exposés à propos de la kaolinite montrent qu'une orientation préférentielle des cristallites existe déjà sur la pâte argileuse de départ et que celle-ci s'accroît rapidement.

Ceci tend à montrer que l'organisation du matériau consiste en une simple *juxtaposition* d'unités morphologiques indépendantes les unes des autres, plutôt qu'à un véritable assemblage qui impliquerait la présence de liaisons entre ces mêmes unités.

Cette impossibilité de la kaolinite à s'associer est conforme aux données antérieures dues à Schofield et Samson (1953-1954) et à Michaels et Bolger (1964).

— En revanche, dans la montmorillonite et l'illite, l'existence d'une phase de retrait sans orientation préférentielle perceptible nous amène à penser que l'organisation individualisée repose sur des interactions entre les unités morphologiques du type bord-face.

Sur la montmorillonite, ce fait est d'ailleurs confirmé au moyen du MEB, qui montre à complète dessiccation le maintien des liaisons bord-face (cliché 10).

Mais ce qui différencie les deux argiles, illite et montmorillonite, à ce niveau, et qui explique les différences qui existent entre les corps poreux, c'est la constitution de l'unité morphologique.

Dans l'une, la montmorillonite, les unités morphologiques sont peu épaisses, développent donc une grande surface externe ; la taille du tactoïde est donc impor-

tante ($> 2\ \mu$). Dans l'autre, l'illite, les unités morphologiques sont complexes (assemblage bord-bord — face-face des particules primaires) ; par conséquent la surface externe vraie est limitée ; en outre, la dimension de ces agrégats est plus petite ($0{,}4\ \mu$ environ).

A ce sujet, nous avons été amenés à imaginer un arrangement tridimensionnel constitué par des pores de section cubique dont chaque face est constituée par une unité morphologique. Connaissant la surface externe, nous sommes à même d'évaluer le côté du pore compatible avec l'existence d'une organisation tridimensionnelle continue. Or, dans la montmorillonite, la surface externe mesurée avec la technique BET est évaluée à environ 60 m^2/g, alors que dans l'illite, cette technique ne rendant pas compte de la surface externe des unités morphologiques, nous avons ramené celle-ci à une valeur beaucoup plus réduite que nous situons à 20 m^2/g.

Le tableau 4 regroupe les évaluations des teneurs en eau obtenues dans le cas de l'illite et de la montmorillonite. Ces comparaisons bien que grossières montrent que les teneurs en eau stockées par chaque argile seraient complètement différentes d'un minéral à l'autre : pour la montmorillonite, avec des unités de l'ordre de $2\ \mu$ nous pouvons emmagasiner 2 000 p. 100 d'eau, tandis que dans l'illite la dimension des unités morphologiques irait de pair avec une teneur en eau de l'ordre de 100-150 p. 100. Ainsi, ce modèle rend assez bien compte de la réalité.

TABLEAU 4

Utilisation du modèle cubique pour évaluer, à diverses teneurs en eau, le diamètre du pore compatible avec l'existence d'une architecture tridimensionnelle continue

Evaluation from the cubic modele of the pore size compatible with a continuous threedimensional organization

Illite (20 m^2/g)		Montmorillonite (60 m^2/g)	
Teneur en eau ($cm^3/100\ g$)	∅ du pore (μ)	Teneur en eau ($cm^3/100\ g$)	∅ du pore (μ)
300	0,9	5 000	$5\ \mu$
150	0,45	2 000	$2\ \mu$
100	0,30	1 500	$1{,}5\ \mu$
75	0,22	1 000	$1\ \mu$
50	0,15	750	$0{,}75\ \mu$
25	0,07	300	$0{,}30\ \mu$

3. — *Evolution de l'organisation du matériau au cours du retrait* (fig. 10*b*)

a) Dans la kaolinite, l'évolution de l'organisation est simple, puisque chaque particule se comporte de façon indépendante par rapport à sa voisine, l'orientation mutuelle, au fur et à mesure que la teneur en eau s'abaisse, ne résulte que de la mise en œuvre d'éléments de nature *stérique* : taille et épaisseur de l'unité morphologique.

Au contraire, dans la montmorillonite et dans l'illite, nous devons tenir compte de l'existence de *liaisons* entre les unités morphologiques, ainsi que de la *déformabilité* de ces mêmes unités.

b) Dans l'illite, l'orientation des particules ne se produit pas immédiatement. Il faut atteindre pF 2,5, pour que les liaisons entre les unités morphologiques se rompent et pour qu'une orientation apparaisse. Or, tout se passe comme si l'effondrement de l'organisation se produisait sans que les unités morphologiques ne se déforment (cliché 5). Cette rigidité découle certainement du mode de constitution de l'unité morphologique (B-B-F-F).

c) Dans la montmorillonite, l'orientation préférentielle des particules ne se manifeste pas dès le départ. Mais la grande différence avec l'illite réside dans le fait que le matériau passe de 750 p. 100 à 350 p. 100 d'eau pondérale sans qu'une orientation préférentielle apparaisse. Pour expliquer ce fait, il est nécessaire de faire intervenir une certaine déformabilité des unités morphologiques que nous avons d'ailleurs constatée à l'examen au microscope électronique à balayage.

Il faut encore ajouter que cette déformabilité est rendue possible grâce à la constitution de l'unité morphologique, qui permet une déformation sans rupture de la particule. Il est remarquable de constater à ce sujet que les liaisons bord-face dont nous avons parlé, sont conservées jusqu'à la phase ultime du retrait.

d) Enfin, en ce qui concerne l'argile HB, l'évolution de l'organisation se ramène au cas de l'illite. Comme pour cette dernière, l'organisation de départ met en œuvre une disposition bord-face des unités morphologiques. Si l'argile HB est légèrement plus hydratée au départ, c'est parce que les unités morphologiques sont de plus grande dimension. Toutefois, cette hydratation n'est pas comparable à celle de la montmorillonite du fait que les unités morphologiques des minéraux 2/1 de l'argile HB possèdent un faciès micacé (B-B-F-F) qui n'est en aucune façon comparable au faciès rubanné de la montmorillonite (B-B). C'est ce qui explique que l'argile HB ait un comportement illitique.

* * *

Nous avons donc retracé la phase initiale du retrait qui est caractérisé par une évolution importante des organisations, pratiquement jusqu'à leur effondrement complet.

La phase suivante du retrait est marquée quant à elle, par une évolution beaucoup plus imperceptible de l'organisation du système poreux, en sorte que, l'étude consistera à analyser plus spécialement l'organisation finale ainsi acquise.

4. — *Organisation finale du matériau : apparition d'une limite de retrait*

Une des manifestations les plus significatives des sols argileux réside généralement dans l'apparition aux forts états de dessiccation d'une limite de retrait.

Ce type de comportement a été analysé pour la première fois par Haines (1923). Signalons d'un autre côté que dans le domaine du Génie Civil, cette notion a été utilisée par Peltier.

En ce qui concerne nos matériaux, nous distinguons deux types de comportements :

a) Celui de la kaolinite, de l'illite et de l'argile HB pour lesquelles il existe une véritable limite de retrait. Celle-ci apparaît lorsque, après effondrement de l'organi-

sation primitive, le contact solide-solide (et en particulier le contact face-face) des unités morphologiques devient la règle.

Toutefois, pour ce qui est de ces trois argiles, si les valeurs de la porosité obtenues à la limite de retrait sont similaires (36 à 38 p. 100), nos résultats tendent à montrer que celle-ci recouvre plusieurs composantes (fig. 11) :

1) l'une d'elle est liée à l'organisation des unités morphologiques et correspond aux espaces laissés libre entre ces mêmes unités ;

2) l'autre est contenue dans les micro et macrofissures et s'applique à une organisation plus grossière ;

3) la dernière enfin occupe les vides qui se situent entre les particules primaires au sein de l'unité morphologique et serait accessible à l'azote.

— Dans la kaolinite, seule la composante (*a*) existerait.

— Dans les argiles à morphologie d'illite la composante (*b*), la plus contingente, risque d'être inhérente à la méthode que nous avons employée pour amener les matériaux à dessiccation, tandis que la composante (*c*) serait, elle, caractéristique de ces matériaux. Au demeurant, nous n'avons pu évaluer la part respective correspondant à chaque type de porosité.

FIG. 11. — *Schéma de l'organisation d'une argile du type illite à la limite de retrait.*

(*a*) porosité interunités morphologiques ;
(*b*) porosité fissurale ;
(*c*) porosité interparticules primaires.

Schematic representation of the organization of an illite clay at the shrinkage limit.

(*a*) porosity of the morphologic units ;
(*b*) fissural porosity ;
(*c*) porosity of the primary particles.

b) Comportement de la montmorillonite. Dans le cas de ce minéral, nous n'avons pas constaté de véritable limite de retrait. Aussi la diminution du volume se fait par phases successives ; dans un premier temps et pour les pF $<$ 4,8, le retrait se produit sans modification de l'épaisseur apparente des feuillets, il en résulte que l'eau située entre ces mêmes feuillets peut être considérée comme faisant partie de la structure.

Ensuite et en chauffant l'échantillon jusqu'à 300 °C, nous atteignons une porosité voisine de 25 p. 100.

Afin d'expliquer ce comportement particulier, nous nous réfèrerons aux travaux de Mamy (1968) et Prost (1975). Ces auteurs montrent que la montmorillonite Ca conserve de l'eau entre les feuillets jusqu'à de très faibles tensions de vapeur d'eau. Aussi, n'est-il pas étonnant que celle-ci puisse subir encore un retrait.

En revanche, pour tenter d'expliquer le fait que la porosité finale obtenue (25 p. 100) se révèle très inférieure à celle des autres argiles (36-38 p. 100), nous sommes amenés à faire intervenir la déformabilité de particules argileuses propre à la montmorillonite.

Conclusions générales

Dans les conditions expérimentales où nous avons réalisé les expériences (argiles pures rendues calciques), nous avons précisé les modalités de l'évolution de l'organisation des matériaux au cours du phénomène de retrait.

— Cela nous a amené tout d'abord à considérer l'existence d'une particule qui joue le rôle stérique primordial et que nous avons appelé *unité morphologique*. Ainsi, nous avons défini, pour nos matériaux calciques, trois types d'unités morphologiques :

a) le type kaolinite ; il s'agit de cristallites élémentaires ;

b) le type illite, qui se révèle commun à l'illite et à ses minéraux de transformation : vermiculite et smectite. Ici l'unité morphologique est une sorte d'agrégat constitué par l'assemblage bord à bord et face à face des particules primaires ;

c) le type montmorillonite constitué par l'assemblage bord à bord d'un grand nombre de particules primaires.

L'assemblage des particules primaires joue directement sur la constitution des unités morphologiques. Il détermine en grande partie l'*hétérogénéité granulométrique* du matériau, et la *surface externe vraie* ; en même temps, il est à la base de l'existence d'une plus ou moins grande *déformabilité*.

— Dans nos matériaux, aux fortes teneurs en eau (pF_1-pF_2), les unités morphologiques peuvent s'organiser de différentes manières :

a) Soit comme dans la kaolinite, où chacune d'elle se comporte de façon indépendante et l'organisation du matériau consiste en une simple juxtaposition des cristallites. Dans cette situation, l'évolution de l'organisation est seulement commandée par des facteurs de nature stérique (taille, forme) et les particules se disposent face à face pour occuper le volume le plus restreint possible.

b) Soit qu'une véritable organisation, qui implique la présence de liaisons entre les unités, apparaîsse : dans cette circonstance, les unités s'associent bord-face. Toutefois, suivant le mode de constitution de celles-ci, nous notons deux variantes :

— Dans l'illite et ses minéraux de transformation, les unités morphologiques sont rigides, la surface externe *vraie* est limitée, la taille des particules faible ; dans ces conditions, le matériau ne peut pas stocker beaucoup d'eau sans perdre sa cohésion, et notre étude nous amène à penser que l'évolution de l'organisation du matériau procède d'un effondrement de l'organisation isotrope. Cet effondrement se ferait par *rupture des liaisons bord-face* entre les unités morphologiques.

— Dans la montmorillonite, des unités morphologiques de grande dimension $> 2\,\mu$ particulièrement minces développent une surface externe importante. Ces unités associées entre elles surtout bord-face constituent un réseau tridimensionnel particulièrement lâche, qui est capable de stocker beaucoup d'eau.

Toutefois, contrairement à ce qui se passe dans l'illite, l'évolution de l'organisation ne procède pas de ruptures de liaisons entre les unités, mais se révèle être essentiellement une contraction d'un réseau tridimensionnel *déformable*, qui se produirait sans que de véritables zones de rupture apparaissent.

Ajoutons aussi que, dans la montmorillonite Ca, l'épaisseur apparente des feuillets restant constante pour les pF $\leqslant$ 4,8, le retrait de la montmorillonite est essentiellement un phénomène interparticulaire et se ramène donc au cas des autres matériaux argileux. Ainsi, ce qui différencie la montmorillonite des autres argiles ce n'est pas l'existence de feuillets 2/1 expansibles, mais le fait de pouvoir réaliser un réseau tridimensionnel lâche et déformable.

Aussi, bien que ces études aient été effectuées seulement par dessiccation sur quatre matériaux argileux calciques, nous pouvons déjà prévoir que seules les argiles à morphologie de montmorillonite seront capables de s'hydrater fortement et de subir un retrait important. Il est aussi prévisible que tous les comportements particuliers constatés avec les argiles de la même famille, qu'il s'agisse du développement pédologique des profils ou des propriétés physiques et mécaniques, ne pourront être obtenus qu'avec ce type morphologique. En revanche, les vermiculites ou les argiles interstratifiés ne paraissent pas devoir conduire à un comportement analogue.

Enfin, ajoutons que dans des conditions physicochimiques et/ou hydriques différentes, le comportement d'un matériau pourra être modifié plus ou moins profondément. Il apparaît donc que les conditions du milieu pourront jouer un rôle essentiel, quant à la composition des particules argileuses, à leur association et en définitive au comportement général des sols.

Reçu pour publication en octobre 1978.

Remerciements

Je tiens à remercier MM. J. Mamy et G. Pédro (Station de Science du sol de Versailles, I.N.R.A.) qui m'ont fait bénéficier de leurs conseils lors de la rédaction de cet article.

Summary

Study of the organisation of calcic clays. Evolution during shrinkage

Samples of kaolinite, illite, montmorillonite and interstratified clay saturated with calcium were prepared in a slurry form and successively submitted to graduated pressures equivalent to a pF range of 1 to 6.5.

At each pF value the orientation of the particles as well as the apparent thickness of the layers were measered by X-ray diffraction. Moreover scanning microscopy has made possible the precise determination of the nature of the clay particles within the various materials.

This work shows that clay structure differs according to clay type. In kaolinite there are only primary particles (crystals) ; in the other clays there are associations : there are either aggregates as in illite and interstratified clay or associations of particles of a longer range order ($> 2\,\mu$) as in montmorillonite.

For each case studied our results show that the refered particles play a preponderant steric role during shrinkage and can thus be considered as real morphological units. This leads us to consider clay shrinkage as a phenomenon which mainly occurs between the particles and greatly depends on steric parameters (size, form) and particles associations.

From this point of view montmorillonite do es not differ from the other clays, shrinkage brings only a looser solid network into play which seems easier to distort.

Zusammenfassung

Untersuchung der anordnung der kalktöne. Entwicklung während des austrocknens

Kalziumgesättigte Proben von Kaolinit, Illite, Montmorillonite und eines Zwischenschichttons wurden als Grundparste vorbereitet und stufenweise Drücken von pF 1,0 bis pF 6,5 unterworfen.

Nach jeder Beanspruchung wurden die Orientierung der Teilchen sowie die scheinbare Dicke der Blättchen an Hand der Roentgenstrahlenbeugung gemessen. Daneben ermöglichen die raster mikroskopischen Untersuchungen die Beschaffenheit der Tonteilchen innerhalb der verschiedenen untersuchten Materialien zu bestimmen.

Daraus geht hervor dass die Tonanordnung Teilchen verwendet, deren Beschaffenheit je nach Tonart verschieden ist. In Kaolinit handelt es sich um Primärteilchen ; in den anderen Tonarten findet man mehr oder weniger komplexe Zusammenstellungen, d. h entweder Aggregate von Primärteilchen in Illit und Zwischenschichtton, oder Zusammenstellungen von Teilchen mit sehr wichtiger Seitenentwicklung ($> 2\,\mu$) in Montmorillonit.

Für jeden untersuchten Fall zeigen unsere Ergebnisse, dass die aufgezeigten Teilchen während der Schrumpfung eine vorherrschend sterische Rolle spielen und deshalb als echte morphologischen Einheiten betrachtet sein können. Dies veranlasst uns, die Tonschrumpfung als eine hauptsächlich zwischen deu Teilchen statifindende Erscheinung zu betrachten, die von weitgeneud sterischen Parmetern (Grösse, Form) und der Teilchenzusammenstellung abhängt.

In diesem Gesichtspunkt unterscheidet sich Montmorillonit nicht von den anderen Tonarten ; die Schrumpfung bringt nur ein etwas lockereres festes Netz zum Vorschein, das somit verformungsfähiger scheint.

РЕЗЮМЕ

Изучение организации известковых глин. Эволюция при высыхании.

Д. ТЕССЬЕ.

Образцы каолинита, иллита, монтмориллонита и пластовой слоистой глины, насыщенные известью, приготовлялись в виде пасты и подвергались ступенчато увеличивающимся давлениям от p F = 1,0 до p F = 6,5.

После каждого увеличения давления, с помощью диффракции рентгеновских лучей измерялись ориентация частичек и видимая толщина листков. Проводившиеся кроме того микроскопические наблюдения позволили уточнить состав глинистых частичек внутри каждого из изучавшихся материалов.

Опыт этот показал что изучавшиеся глины сформированы из частичек состав которых различен и зависит от природы этих глин. Каолинит состоит из первичных частичек ; другие глины состоят из более или менее сложных ассоциаций : это, или агрегаты первичных частичек, в случае иллита и пластовой слоистой глины, или ассоциации частичек сильно развитых в ширину ($> 2\,\mu$), в случае монтмориллонита.

Результаты полученные в каждом изученном случае показывают что рассматриваемые частички играют при усыхании преобладающую стерическую роль и что их можно рассматривать как настоящие морфологические единицы. Это заставляет рассматривать усыхание глин как явление главным образом меж-частичковое, широко зависящее от стерических параметров (размеры, форма), как самих частичек, так и их ассоциаций.

С этой точки зрения монтмориллонит не отличается от всех других испытанных глин и усыхание делает только менее плотной его прочную сеть, что и заставляет ее казаться более легко способной к деформации.

Références bibliographiques

BANIN A., LAHAV N., 1968. Optical study of particle size of montmorillonite with various adsorbed cations, *Nature*, **217,** 1146-1147.

BANIN A., LAHAV N., 1968. Particle size and optical properties of montmorillonite in suspension. *Isr. J. Chem.* **6,** 235-250.

BARSHAD I., 1953. Adsorptive and swelling properties of clay water system. *Clays clay Techn., Bull.*, **169,** 70-77.

BLACKMORE A. V., MILLER R. D., 1961. Tactoid size and osmotic swelling in calcium montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 169-173.

EMERSON W. W., 1962. The swelling of Ca — Montmorillonite due to the water absorption. 2. Water uptake in the liquid phase. *J. Soil Sci.* **13,** 40-45.

FLEURANCE A., NICOLAS J., 1964. Observations sur la notion d'ordre et de désordre de certains minéraux du groupe de la kaolinite. *Bull. Groupe fr. Argiles XIV*, série 9, 149-162.

GABIS V., 1958. Etude préliminaire des argiles oligocènes du Puy en Velay (Haute Loire). *Soc. fr. Min. Cristal.* **81,** 183-185.

GRIM R. E., 1953. *Clay Mineralogy*, Mc Graw-Hill, New York, 384 p.

GUYOT J., 1969. Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption. *Ann. agron.*, **20** (4), 333-359.

HAINES W. B. (1923). The volume changes associated with variations of water content soils. *J. agr. Sci.*, **13,** p. 296.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite. Propriétés diélectriques et structure du film d'eau.* Thèse Faculté des Sciences Paris.

MERING J., 1946. The hydration of montmorillonite. *Disc. Faraday Soc.*, 32 B, p. 205.

MERING J. et OBERLIN A., 1971. The smectites. In *The electron-optical Investigation of clays*, Mineralogical Society London, Ed., 135-145.

MICHAELS A. S., BOLGER J. C., 1964. Particle interactions in aqueous kaolinite dispersions. *I and E. C. Fundamentals*, vol. 3, 14-20.

MONNIER G., STENGEL P., FIÈS J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.* **24** (5), p. 533.

NORRISH K., 1954. Crystalline swelling of montmorillonite. *Nature*, 173, p. 255.

PROST R., 1975. *Etude de l'hydratation des argiles : interaction eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau.* Thèse Faculté des Sciences Paris.

QUIRK J. P., 1968. Particle interaction and soil swelling. *Isr. J. Chem.* **6,** 213-214.

ROBERT M., 1972. Transformation expérimentale de glauconite et d'illites en smectites. *C. R. Acad. Sc. Paris* **275,** série D, 1319-1322.

SCHOFIELD R. K., SAMSON H. R., 1954. The flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged cristal faces. *Disc. Faraday Soc.* **18,** 135-145.

SHAINBERG, KEMPER, 1966. Electrostatic forces between clay and cations as calculated and inferred from electrical conductivity. *Clays Clay Miner.* **XIV,** 117-132.

SILLS I. D., AYLMORE L. A. G., QUIRK J. P., 1973. An analysis of pore size in illite - kaolinite mixtures. *J. Soil Sci.*, **24** (4), 480-490.

TESSIER D., 1978. Technique d'étude de l'orientation des particules argileuses utilisable sur des échantillons secs ou humides. *Ann. agron.*, **29** (2), 193-207.

VAN OLPHEN H., 1972. *Particle growth in suspensions.* Organisé par The Society of chemical industry colloid and surface chemistry group à Brunel University. Edité par A. C. SMITH, Academic Press (1973).

Annexe

Résultats des mesures globales effectuées au cours du retrait des quatre argiles

TABLEAU 1

Mesures globales caractérisant le retrait obtenues sur la kaolinite

Les mesures du volume ont été établies pour un minéral dont la densité réelle est de 2,67 (37,4 cm^3 pour 100 g) et V air = V apparent — (V eau + V solide)

Characteristic data concerning the shrinkage observed with kaolinite

Volume measurements have been carried out with a clay whose true density is 2,67

Contrainte appliquée à l'échantillon	Volume total pour 100 g de solide	Volume d'eau pour 100 g de solide	Volume d'air pour 100 g de solide	Volume total pour 100 g de solide	Volume d'eau pour 100 cm^3 de solide	Porosité totale en p. 100	Porosité occupée par l'air (p. 100 du volume total)	Quantité d'eau extraite entre deux équilibres successifs
Nulle	313,8	276,3	0,1	838	737,7	88,1	—	
1	246,2	208,0	0,8	657,3	555,4	84,8	0,3	
1,5	212,5	173,9	1,4	567,4	464,3	82,4	0,6	34,1
2	185,6	148,7	—	495,6	397,1	79,8	—	25,2
2,5	131,0	92,9	0,7	349,8	248,0	71,5	1,0	55,8
3	118,2	79,8	0,9	315,6	213,1	63,4	1,6	13,1
3,5	93,0	54,9	0,7	248,3	146,6	59,8	0,7	24,9
4	81,3	43,8	0,1	217,1	116,9	54,0	0,1	11,1
4,2	76,4	38,5	0,5	204,0	102,8	51,0	0,6	5,3
4,4	76,9	31,3	8,2	205,3	83,6	51,4	10,6	7,2
4,8	64,3	20,5	6,4	171,7	54,7	41,8	10,0	10,8
5,4	63,8	5,9	20,5	170,3	15,8	41,4	32,1	14,6
5,75	61,4	4,6	19,4	163,9	12,3	39,1	31,6	1,3
6,2	61,3	0,3	23,6	163,7	0,8	39,0	38,5	4,3
6,5	60,8	0,3	23,1	162,3	0,8	38,5	38,0	0

TABLEAU 2

Mesures globales caractérisant le retrait de l'illite
Les résultats ont été calculés pour une densité réelle de 2,80 (35,7 cm^3 pour 100 g de solide)

Characteristic data concerning the shrinkage observed with illite
The results have been computed with a true density equal to 2,80

Contrainte appliquée à l'échantillon	Volume total pour 100 g de solide	Volume d'eau pour 100 g de solide	Volume d'air pour 100 g de solide	Volume total pour 100 cm^3 de solide	Volume d'eau pour 100 cm^3 de solide	Porosité totale en p. 100	Porosité occupée par l'air (p. 100 du volume total)	Quantité d'eau extraite entre deux équilibres successifs
Nulle	174,0	137,0	1,3	487,2	383,6	79,5	0,7	
1	135,1	97,7	1,7	378,3	273,6	73,6	1,2	
1,50	126,5	89,3	1,5	354,2	250,0	71,2	1,0	2,4
2	116,6	80,0	0,9	326,5	224,0	69,4	0,7	9,3
2,5	102,2	66,5	0	282,2	186,2	65,0	0	13,5
3	92,2	55,8	0,7	258,2	156,2	61,3	1,2	10,7
3,5	85,8	48,5	1,6	240,2	135,8	58,4	1,9	7,3
4	82,1	43,6	2,8	229,9	122,1	56,5	6,6	4,9
4,2	79,0	38,2	5,1	221,2	107,0	54,8	10,0	5,4
4,4	81,0	36,6	8,7	226,8	102,5	55,9	10,7	1,6
4,8	66,7	28,9	7,1	186,8	80,9	46,5	10,6	7,7
5,4	65,3	9,5	20,1	182,8	26,6	45,3	30,8	19,4
5,75	65,5	7,2	22,6	183,4	20,2	45,5	34,4	2,3
6,20	65,2	3,8	25,7	182,6	10,6	45,2	39,3	3,4
6,50	65,1	0,1	29,2	182,3	0,3	45,1	45	3,7

TABLEAU 3

Mesures globales caractérisant le retrait de la montmorillonite
Les résultats ont été établis pour une densité réelle de 2,70 (37 cm^3 pour 100 g de solide)

Characteristic data concerning the shrinkage observed with montmorillonite
The results have been computed with a true density equal to 2,70

Contrainte appliquée à l'échantillon	Volume total pour 100 g de solide	Volume d'eau pour 100 g de solide	Volume d'air pour 100 g de solide	Volume total pour 100 cm^3 de solide	Volume d'eau pour 100 cm^3 de solide	Porosité totale en p. 100	Porosité occupée par l'air (p. 100 du volume total)	Quantité d'eau extraite entre deux équilibres successifs
Nulle	812,9	754,1	21,8	2 170	2 036	95,4	2,7	—
1	553,3	498,3	18,0	1 494	1 354	93,3	3,2	—
1,25	545,2	490,3	17,9	1 472	1 324	93,2	3,3	8,0
1,50	504,4	448,3	19,1	1 362	1 210	92,6	3,8	42,0
1,75	470,6	415,3	18,3	1 270	1 121	92,1	3,9	33,0
2	424,4	370,4	17,0	1 146	1 000	91,2	4,0	44,9
2,25	396,9	348,3	11,6	1 072	940	90,7	2,9	22,1
2,50	248,5	206,0	5,5	671	556	85,1	2,2	142,3
2,75	227,6	185,8	4,8	614	502	83,7	2,1	20,2
3,00	197,5	157,2	3,3	533	424	81,2	1,7	28,6
3,5	137,5	99,4	1,5	371,2	268,4	73,2	1,1	57,8
4	134,3	95,1	2,2	362,6	256,8	72,4	1,6	54,3
4,2	129,2	89,1	3,1	348,8	240,6	71,3	2,4	6,0
4,4	121,0	73,3	10,7	326,7	197,9	69,4	18,9	15,8
4,8	79,3	41,6	0,7	214,1	112,3	53,3	0,9	31,7
5,4	64,2	20,7	6,5	173,3	55,9	42,3	10,1	20,9
5,75	61,3	17,6	6,7	165,5	47,5	39,6	10,1	3,1
6,2	56,1	4,3	14,8	151,5	11,6	34,0	26,4	13,3
6,5	55,2	4,1	14,1	149,0	11,1	33,0	25,5	0,2

TABLEAU 4

Mesures globales caractérisant le retrait de l'argile HB
Les résultats ont été calculés pour une densité réelle de 2,81 (35,6 cm^3 pour 100 g)

Characteristic data concerning the shrinkage observed with HB clay
The results have been computed with HB clay whose true density is equal to 2,81

Contrainte appliquée à l'échantillon	Volume total pour 100 g de solide	Volume d'eau pour 100 g de solide	Volume d'air pour 100 g de solide	Volume total pour 100 cm^3 de solide	Volume d'eau pour 100 cm^3 de solide	Porosité totale en p. 100	Porosité occupée par l'air (p. 100 du volume total)	Quantité d'eau extraite entre deux équilibres successifs
Nulle	245,0	207	2,4	688,4	581,7	85,5	0,9	
1	181,0	145	0,4	508,6	407,4	80,3	0,2	
1,5	168,6	133	0,4	473,8	373,7	19,1	0,2	12
2,0	159	123	0,4	446,8	345,6	77,6	0,3	10
2,5	143	106	1,4	401,8	297,8	75,1	0,9	17
3	117,2	82	0	328,2	230,4	70,0	0	24
3,5	99,4	62,5	1,3	278,3	178,6	64,2	1,3	19,5
4	98,4	58,3	4,5	275,5	163,8	63,8	4,6	4,2
4,2	95,1	56,6	2,9	266,3	159,0	62,6	3,0	1,7
4,4	90,0	47,0	7,4	252,0	132,1	60,4	8,2	9,6
4,8	73,5	26,7	11,2	205,8	75,0	51,6	15,2	20,3
5,4	63,2	21,8	5,8	176,9	61,3	43,7	9,2	4,9
5,75	64,0	18,2	10,2	179,2	51,1	44,4	15,9	3,6
6,2	63,5	4,4	23,5	177,8	12,4	43,9	37,0	13,8
6,5	60,7	2,8	22,3	170,0	7,9	41,4	36,7	1,6

Ann. agron., 1978, **29** (4), 357-379.

Quelques aspects nouveaux de la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol

R. MOREL

avec la collaboration technique de Thérèse LASNIER

Chaire de Physico-chimie et Science du Sol,
I.N.A. Paris-Grignon,
78850 *Thiverval-Grignon*

Résumé

Nous présentons dans ce mémoire deux modèles compartimentaux sur les transferts respectifs du carbone et de l'azote dans le sol. Les états d'équilibre et de déséquilibre sont traités, conduisant à des expressions de la même forme mathématique qui précisent les facteurs déterminants des quantités des deux éléments présentes dans le sol ; au temps t, ces quantités sont notamment fonction des taux nets de minéralisation de chacun de ces éléments et, de plus, pour l'azote, de la partie de l'azote minéralisé qui se réorganise dans les micro-organismes et la masse racinaire.

Les relations établies, par la considération du rapport C/N, permettent d'expliciter la simultanéité d'évolution du carbone et de l'azote. Une interprétation est proposée quant à la constance du rapport C/N généralement observée dans les terres arables.

Une étude comparative montre que le taux net de minéralisation du carbone est plus élevé que le taux net de minéralisation de l'azote ; ces taux peuvent varier au cours du temps lorsque sont modifiées les quantités des deux éléments incorporées au sol.

L'association des modèles relatifs au carbone et à l'azote permet d'aborder l'étude de l'évolution de la matière organique du sol sous un aspect énergétique : les besoins en carbone d'un sol en équilibre sont égaux à la quantité d'azote organique qui disparaît par unité de temps multipliée par la quantité C_γ de carbone (ou d'énergie) nécessaire pour assurer l'évolution biochimique complète de l'unité de masse d'azote organique.

Les propositions développées dans ce mémoire sont appliquées à quelques résultats obtenus sur des dispositifs expérimentaux de très longue durée ; des valeurs de C_γ sont données, ainsi que les taux nets de minéralisation du carbone et de l'azote.

1. — Introduction

Les questions que pose l'évolution quantitative de la matière organique du sol ne reçoivent le plus souvent que des réponses partielles et fréquemment dubitatives. L'une des causes de ces hésitations est due, en partie, au nombre trop limité d'informations couvrant des situations pédo-climatiques et culturales variées. Cet état de fait tient à la lenteur des processus de minéralisation : il en résulte, pour les régions tempérées, que seules des observations sur des périodes suffisamment prolongées permettent d'étudier dans les meilleures conditions l'évolution dans le temps de la matière organique des sols. Les champs d'essais de très longue durée apparaissent dès lors comme des matériels de choix permettant d'apporter des éléments de réfé-

rence pour la résolution des problèmes posés. Cependant, bien que bénéficiant d'une grande sûreté expérimentale, la plupart des résultats obtenus demeurent délicats à interpréter ; des relations de faits apparemment contradictoires sont assez fréquentes, ne laissant place qu'à la plus irritante incompréhension. Ainsi, Steineck et Ruckenbauer (1976) observent, sans pouvoir l'expliquer de façon satisfaisante, une diminution du taux de matière organique sous une culture continue de seigle recevant annuellement 20 t de fumier par hectare. L'une des raisons de ces difficultés réside sans aucun doute dans notre incapacité actuelle à cerner de façon précise les facteurs de l'évolution quantitative de la matière organique des sols et leur importance relative.

Une voie prospective permettant d'améliorer nos connaissances sur le sujet se réfère aux techniques de modélisation appliquées aux transferts des éléments dans le sol.

Nous avons déjà proposé un modèle compartimental concernant les transferts d'azote, appliqué à des résultats d'essais à long terme ; ce modèle a permis de suggérer quelques interprétations de faits expérimentaux (Morel, 1976).

En 1977, Jenkinson et Rayner établissent un modèle dans lequel la matière organique du sol est divisée en cinq fractions différant par leur « demi-vie » estimée à l'aide de ^{14}C. Cette approche, de conception distincte de la première et appliquée aux essais de longue durée de Rothamsted, permet aux auteurs de simuler avec une bonne approximation les variations dans le temps de la teneur en matière organique.

L'évolution de la matière organique dans le sol relève essentiellement des conséquences de l'activité microbienne ; or, deux éléments, l'azote et le carbone, dominent le développement et le fonctionnement cellulaires au cours desquels ils demeurent toujours étroitement associés. Il nous est dès lors apparu opportun de tenter pour le carbone une démarche homologue de celle précédemment conduite pour l'azote. Aussi, proposons nous dans ce mémoire un modèle compartimental relatif aux transferts biochimiques du carbone dans le sol et en déduisons des relations applicables dans les cas d'équilibre carboné. Grâce à la similitude des modèles présentés, nous pouvons expliciter le caractère de simultanéité d'évolution du carbone et de l'azote et en tirer quelques-unes des conséquences les plus significatives :

— Essai d'interprétation de la constance observée du rapport C/N.

— Etude des valeurs de taux de minéralisation du carbone et de l'azote, ainsi que leurs variations dans le temps.

— Approche sur l'évaluation des besoins en apports carbonés des sols en équilibre organique.

Nous tenterons d'appliquer ces concepts théoriques à des résultats obtenus sur des dispositifs expérimentaux de très longue durée.

2. — Modèle sur les transferts de carbone dans le sol

La masse des substances organiques carbonées du sol est divisée en deux compartiments : le compartiment I qui réunit l'ensemble des substances carbonées de la matière vivante, le compartiment II qui représente la masse organique carbonée non vivante (fig. 1).

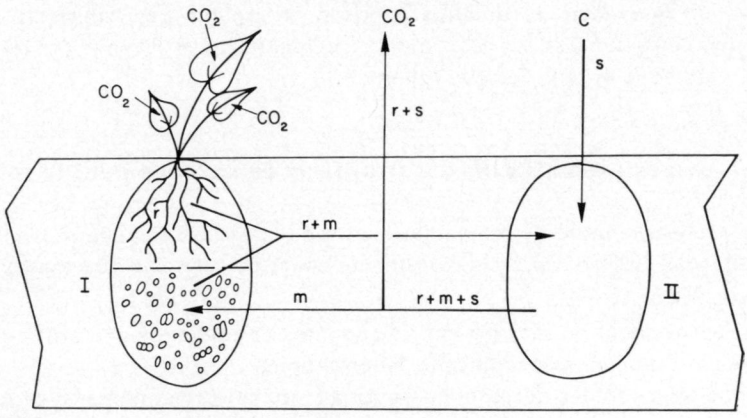


FIG. 1. — *Transferts de carbone dans le sol.*
Carbon transfers in soil.

Le compartiment I est essentiellement composé des masses racinaires et de la micropopulation du sol ; l'origine du carbone de ces deux groupes vivants est différente : le carbone des racines, pour sa quasi-totalité, est d'origine photosynthétique ; la micropopulation, de caractère très largement hétérotrophe, requiert pour sa subsistance le carbone organique de la masse organique non vivante du compartiment II. Celui-ci est alimenté, après leur mort, par les racines et les micro-organismes du compartiment I, ainsi que par les apports au sol de substances organiques.

La minéralisation de la matière organique du compartiment II relève, par voie enzymatique, de l'activité microbienne du sol ; la micropopulation hétérotrophe dispose ainsi du carbone nécessaire à l'édification de ses structures et du carbone lui permettant de satisfaire à ses besoins énergétiques. Le carbone structural se retrouve dans la masse microbienne du compartiment I sous forme de composés très divers ; le carbone ayant assuré les besoins de la cellule en énergie est en définitive éliminé sous forme de dioxyde de carbone. Ces deux rôles des substances carbonées issues des processus de minéralisation, bien que représentés de façon distincte dans la figure 1, sont évidemment étroitement associés dans le développement cellulaire.

Les flèches tracées sur le modèle rendent compte des transferts essentiels du carbone dans le sol. Nous avons négligé d'autres transferts de caractères physique ou biochimique, dont certains sont d'une grande importance au plan fonctionnel dans le système sol-plante, mais qui demeurent quantitativement limités ; tels sont par exemple les transferts de carbone au niveau des bactéries autotrophes, l'absorption directe de composés organiques carbonés par les racines, les pertes par drainage de substances organiques... Notons d'ailleurs qu'il existe certaines compensations dans ces mouvements annexes du carbone dans les sols ; dans le cas d'un solde positif en carbone organique, la quantité concernée est à ajouter au carbone de la masse racinaire.

Par ailleurs, il n'est pas tenu compte du degré de labilité (ou de stabilité) des différentes substances organiques non vivantes mises en jeu, ce qui conduirait à diviser le compartiment II en plusieurs sous-compartiments ; il serait alors nécessaire

d'introduire de nouveaux paramètres précisant l'ampleur des transferts entre les sous-compartiments concernés ; les travaux de Jenkinson et Rayner (1977) peuvent ouvrir une voie dans le sens de cette réflexion.

3. — Aspects quantitatifs des transferts de carbone dans le sol

Considérons une unité de temps qui sera, par exemple, l'année moyenne d'une rotation culturale. Les transferts de carbone au cours de cette période sont symbolisés sur la figure 1 :

r et m représentent respectivement les quantités de carbone de la masse racinaire et de l'ensemble des micro-organismes hétérotrophes.

s désigne les quantités de carbone apportées au sol (amendements organiques).

Notons qu'en définitive, tout le carbone des masses organiques mises en jeu est dissipé sous forme de dioxyde de carbone après avoir permis l'édification des structures organiques et assumé les besoins énergétiques de la micropopulation hétérotrophe ; quantitativement, l'ensemble de ces besoins a pour expression la somme $(r + s)$.

Soit C la quantité de carbone organique du compartiment II, quantité que nous considérerons comme constante. De même que pour l'étude des transferts d'azote, nous définirons dans le cas d'un sol en équilibre organique les valeurs caractéristiques suivantes :

$$\alpha_c = \frac{r + s + m}{C} \tag{1}$$

taux annuel réel (ou brut) de minéralisation du carbone organique ;

$$\tau = \frac{m}{C} \tag{2}$$

taux annuel de réorganisation du carbone minéralisé ;

$$\psi = \frac{\tau}{\alpha_c} \tag{3}$$

fraction du carbone minéralisé qui est réorganisée dans les structures microbiennes.

$$\theta = \alpha_c - \tau = \alpha_c(1 - \psi) = \frac{r + s}{C}$$

taux net annuel de minéralisation du carbone organique.

Le taux α_c est difficilement accessible : la quantité r n'est estimée que d'une façon approximative ; Jenkinson et Rayner proposent une méthode d'évaluation de la biomasse pouvant donner accès à la valeur m. L'analyse du carbone organique du sol, quant à elle, ne permet pas de distinguer les quantités de carbone de chacun des compartiments (voir remarque en fin de paragraphe).

θ représente la fraction du carbone minéralisé utilisée à des fonctions de caractère énergétique et dissipée sous forme de CO_2. Ce taux est quelquefois calculé pour exprimer l'intensité des processus de minéralisation de la matière organique du sol (Welte et Timmermann, 1976).

Pour étudier l'évolution dans le temps des quantités de carbone organique du sol, écrivons, de même que pour l'azote, le bilan du carbone dans le sol au cours de l'unité de temps considérée (année moyenne d'une rotation culturale).

Le sol s'enrichit des quantités de carbone organique édifiées par les organismes vivants d'une part ($r + m$), de la quantité s directement incorporée au sol, d'autre part.

Dans le même temps, du carbone organique disparaît par minéralisation des substances organiques non vivantes ; nous admettrons que les quantités ainsi dissipées dans l'unité de temps sont proportionnelles à la quantité de carbone contenue dans le compartiment II, le coefficient de proportionnalité n'étant autre que le taux annuel réel de minéralisation α_c. La quantité de carbone minéralisée dans l'unité de temps a donc pour valeur $\alpha_c C$. Remarquons que ce raisonnement traduit implicitement l'hypothèse que les processus de minéralisation relèvent, dans leur ensemble, d'une cinétique du premier ordre ; de même que dans le cas de la minéralisation de l'azote organique, nous accepterons cette proposition.

Le bilan du carbone organique s'établit ainsi :

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = r + m + s - \alpha_c C . \tag{4}$$

m peut être remplacé par sa valeur déduite de l'équation (2) :

$$m = \tau C .$$

La relation (4) s'écrit alors :

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = r + s - (\alpha_c - \tau) C$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = r + s - \theta C . \tag{5}$$

Ecrite en notation différentielle, la relation (5) devient

$$\frac{dC}{dt} = r + s - \theta C$$

dont l'intégration conduit à la valeur de C au temps t :

$$C = \frac{r + s}{\theta} + \left[C_0 - \frac{r + s}{\theta} \right] \exp(-\theta t) . \tag{6}$$

C_0 désigne la quantité de carbone organique au temps $t = 0$.

Lorsque le sol atteint un équilibre carboné, $\frac{\Delta C}{\Delta t} = 0$; d'après (5), $C = \frac{r + s}{\theta}$ ou $C = \frac{r + s}{\alpha_c(1 - \psi)}$ (7), valeur retrouvée par la relation (6) pour $t = \infty$.

Remarque.

Au cours de l'unité de temps, nous avons considéré comme constante et égale à C la quantité de carbone contenue dans le compartiment II, à laquelle s'applique le taux réel de minéralisation.

Cette quantité, en fait, ne peut être définie que d'une façon approchée. Considérons en effet, le système au début de l'unité de temps, époque que nous pouvons fixer

à la fin de l'automne par exemple. La quantité C s'accroît au cours de cette période unitaire des apports s au sol (éventuellement nuls), ainsi que des masses racinaires et microbiennes mortes, r et m. Dans une situation d'équilibre, le système revient à son état initial à la fin de l'unité de temps, période au cours de laquelle une quantité de carbone équivalente à $(r + s + m)$ a progressivement disparu du compartiment II par l'effet des processus de minéralisation ; mais l'évolution quantitative en fonction du temps des pertes par minéralisation est distincte de celle des quantités de carbone alimentant le compartiment II : ainsi, l'incorporation de la quantité s de carbone au sol est ponctuelle ; au contraire, les pertes par minéralisation ainsi que les apports racinaires et microbiens s'échelonnent, selon des rythmes différents, au cours de l'unité de temps. La quantité de carbone du compartiment II est alors fluctuante, variant d'un maximum $C + \varepsilon$, dont la position ne coïncide pas nécessairement avec les apports s au sol, à la valeur C observée au terme de l'unité de temps.

Au plan pratique, la quantité de carbone est fréquemment déterminée sur des échantillons de sol prélevés après l'enlèvement des récoltes. Elle associe le carbone des compartiments I et II. En choisissant cette valeur comme définissant le carbone du compartiment II seul, nous commettons deux erreurs : d'une part une erreur par excès puisque le carbone du compartiment I est inclus dans le résultat, d'autre part une erreur par défaut approximativement égale à $\varepsilon/2$. Ainsi, le choix du résultat analytique comme valeur de C n'apparaît-il pas trop déraisonnable.

3.1. — *Homologie des relations concernant le carbone et l'azote*

L'équation (6) est homologue de celle exprimant l'évolution du taux d'azote organique dans le sol, élaborée par référence à un modèle concernant les transferts d'azote dans le sol (Morel, 1971) ; nous en rappelons brièvement ici l'établissement.

La figure 2 représente le modèle compartimental utilisé ; le compartiment I correspond à l'azote organique des substances organiques vivantes (racines, micro-

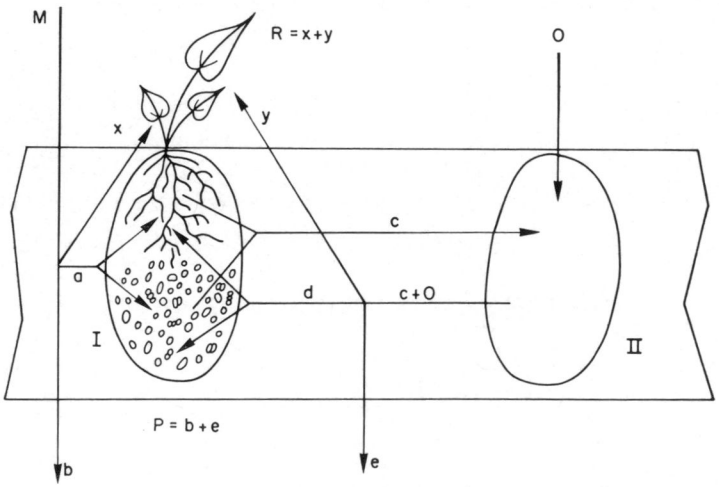


FIG. 2. — *Transferts d'azote dans le sol.*

Nitrogen transfers in soil.

organismes), le compartiment II à l'azote organique de l'ensemble des matières organiques non vivantes. Les lettres affectées aux flèches indiquent les quantités d'azote mises en jeu dans l'unité de temps choisie, l'année moyenne d'une rotation culturale par exemple (1). Si N représente la quantité d'azote organique du compartiment II (voisine de celle déterminée par l'analyse de sol), nous pouvons définir les taux caractéristiques suivants :

$$\alpha_n = \frac{c + 0}{N}$$

taux réel annuel de minéralisation ;

$$\beta = \frac{d}{N}$$

taux annuel de réorganisation de l'azote minéralisé ;

$$\omega = \frac{\beta}{\alpha_n} = \frac{d}{c + 0}$$

fraction de l'azote minéralisé réorganisée dans les racines et les micro-organismes.

$$\gamma = \alpha_n - \beta = \alpha_n(1 - \omega)$$

taux net annuel de minéralisation de l'azote.

De même que pour le carbone, nous pouvons admettre que les processus de minéralisation suivent une cinétique de premier ordre ; dans ces conditions, la perte d'azote du compartiment II par unité de temps a pour valeur α_n N. Dès lors, le bilan de l'azote s'écrit ainsi :

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{0 + a + d}_{\text{gains}} - \underbrace{\alpha_n N}_{\text{pertes}}$$

d est équivalent à βN ; par ailleurs, a peut s'exprimer en fonction de M : nous pouvons en effet proposer l'hypothèse que toute cellule vivante du sol (racine, micro-organisme) ne fait aucune distinction entre l'azote minéral apporté au sol et l'azote issu de la minéralisation, hypothèse qui se traduit par la proportion :

$$\frac{a}{d} = \frac{M}{c + 0}$$

d'où

$$\frac{a}{M} = \frac{d}{c + 0} = \omega \qquad \text{et} \qquad a = \omega M .$$

Le bilan dN/dt s'écrit alors :

$$\frac{dN}{dt} = 0 + \omega M + \beta N - \alpha_n N$$
$$= 0 + \omega M - \gamma N .$$

---

(1) La quantité M d'azote minéral apportée au sol se distribue :

— en une partie x qui exportée par la récolte,

— en une partie a alimentant le compartiment I et qui se trouve incorporée dans la micropopulation du sol et dans les racines,

— en une partie b représentant les pertes (drainage, pertes de caractère biochimique, ...).

Pendant le même temps, l'apport d'azote organique O s'ajoute à la quantité c provenant des organismes morts du compartiment I. De même que pour M, la quantité c + O minéralisée se répartit dans les fractions y (récolte), d (racines et micropopulation) et e (pertes).

L'intégration de cette expression donne la relation :

$$N = \frac{0 + \omega M}{\gamma} + \left[N_0 - \frac{0 + \omega M}{\gamma} \right] \exp(-\gamma t) . \qquad (8)$$

N_0 et N indiquent les quantités d'azote organique du sol aux temps $t = 0$ et t.

La quantité d'azote du sol en équilibre azoté est obtenue en annulant le bilan établi pour l'unité de temps ou bien en donnant à t une valeur infinie dans l'équation (8) :

$$N_{eq} = \frac{0 + \omega M}{\gamma} = \frac{0 + \omega M}{\alpha_n (1 - \omega)} \qquad (9)$$

Comparée à la relation (8), la relation (6) révèle toutefois des difficultés d'application supplémentaires : alors que dans l'étude de l'évolution de l'azote, les quantités apportées au sol demeurent connues et constantes au cours d'un essai (azote organique 0 et minéral M), il n'en est pas de même pour le carbone. L'évaluation de la masse r de carbone apportée annuellement par les racines n'est qu'approchée ; de plus, au cours de l'expérience, cette quantité varie avec le niveau de production des récoltes relevant, quant à lui, de nombreux facteurs. Cependant, lorsque la variation des rendements est peu importante, l'erreur devient relativement faible.

Par contre, la totalité du carbone organique des racines demeure dans le sol alors qu'une fraction seulement de l'azote minéral incorporé est transformée en azote organique restant dans le sol (fig. 2). L'équivalent ψ du coefficient ω n'apparaît donc pas : seul, le paramètre θ est exprimé dans la formule. Aussi, la relation (6) permet-elle de calculer une valeur approchée de θ dans le cas d'un sol en déséquilibre carboné, connaissant les taux de carbone du sol aux temps $t = 0$ et t, ainsi que les quantités s et r.

4. — Facteurs déterminants des teneurs du sol en carbone et en azote organiques

Les relations (7), (9), (6) et (8) expriment ces teneurs, soit dans un état d'équilibre, soit dans une situation évolutive ; elles définissent clairement les facteurs déterminants des niveaux carbonés et azotés des sols à un instant donné et qui sont :

— l'ampleur des apports carbonés et azotés r, s, 0 et M ;

— les taux réels de minéralisation α_c et α_n ainsi que les coefficients de réorganisation ψ et ω ;

— le temps écoulé depuis le changement des conditions de traitement du sol s'il s'agit d'un système en évolution.

Les niveaux d'équilibre carboné et azoté des sols apparaissent ainsi fonction des facteurs fondamentaux suivants :

— pour le carbone r, s, α_c et ψ ;

— pour l'azote 0, M, α_n et ω.

Pour une situation culturale déterminée (0, M, s, r connus), cet équilibre est lié aux valeurs de α_c, α_n, ψ et ω dont nous examinerons brièvement ci-après les facteurs particuliers de variation.

Les taux réels annuels de minéralisation demeurent essentiellement fonction de l'activité microbienne ; celle-ci dépend en premier lieu des facteurs généraux bien connus : humidité, température, aération... ; en second lieu, elle varie selon les substances organiques mises en jeu, dont la vulnérabilité relève de leur nature, de leur composition et de leur état de liaison avec la fraction minérale du sol. Enfin, cette activité est également liée à la quantité d'azote minéral présente à l'instant considéré dans le sol (Lindemann, 1977).

L'ampleur de la réorganisation de l'azote, définie par le coefficient ω, est liée à plusieurs facteurs :

— l'intensité de la prolifération microbienne, celle-ci étant étroitement associée aux processus de minéralisation ; remarquons que cette intensité relève non seulement de la masse de micro-organismes à un instant donné, mais aussi du nombre de générations qui se développent au cours de l'unité de temps. Soulignons que cette activité, fonction des quantités d'azote minéral, dépend également des quantités de carbone organique disponibles ;

— l'importance de la quantité d'azote réorganisée dans la masse racinaire pendant toute la durée de la vie de la plante ;

— l'ampleur des pertes : drainage, dénitrification, quantités d'azote exportées dans la récolte ; notons que ces dernières sont en relation avec la quantité d'azote des racines ;

— l'importance quantitative des apports d'azote du sol : généralement, la réorganisation apparaît d'autant plus marquée que ces apports sont plus faibles (Rémy, 1975 ; Morel, 1976).

La réorganisation du carbone ne révèle pratiquement, quant à elle, que des caractéristiques propres à l'activité microbienne, les facteurs qui en définissent l'ampleur sont donc moins nombreux que ceux qui affectent la réorganisation de l'azote. La proportion de carbone structural édifiée dans le sol par les micro-organismes hétérotrophes dépend de l'orientation générale du métabolisme de ces derniers au sein de leur proche environnement à l'instant considéré. A titre d'exemples, la proportion de carbone de structure organisée par rapport à la quantité de carbone consommée est fort différente en aérobiose et anaérobiose, différente également s'il s'agit de croissance de la microflore ou de la simple maintenance.

Il reste bien entendu que les valeurs de α_c, α_n, ψ et ω correspondent, pour l'unité de temps, à l'ensemble des processus physiques, chimiques et biochimiques qui se produisent dans la masse totale du sol concernée. Mais ces valeurs présentent sans aucun doute, au cours de la période unité considérée, des variations selon les différents sites du sol d'une part, des variations dans le temps d'autre part.

5. — Rapport C/N

Etroitement associés dans la cellule vivante et dans de très nombreuses substances composant la matière organique du sol, le carbone et l'azote évoluent simultanément. Les deux éléments sont le plus souvent associés dans toute étude sur l'évolution de la matière organique du sol ; le rapport C/N, fréquemment évoqué, explicite cette association.

Les relations (6) et (8) permettent de préciser la valeur du rapport C/N au temps t compté après le début d'une expérimentation. Il semble que dans un grand nombre de cas, ce rapport demeure assez stable ; en effet, il est d'observation générale que dans une situation pédoclimatique donnée, ses variations restent faibles malgré des conditions culturales différentes. L'exemple que nous offrent les parcelles expérimentales du dispositif Dehérain * est à cet égard significatif : soumis depuis de nombreuses années à des traitements sans aucune fertilisation, ou bien avec une fumure minérale seule ou exclusivement organique ou minérale déséquilibrée, le sol accuse un rapport C/N qui, dans tous les cas, s'établit au voisinage de 9 (cf. tabl. 3, p. 374) (Morel, 1968). Plusieurs auteurs notent la même constatation ; certains désignent ce rapport comme « une constante de la nature adaptée aux conditions de sol et de climat » (Welte et Timmermann, 1976).

Nous pouvons nous interroger sur les raisons de cette faible variabilité du rapport C/N ; une indication dans ce sens nous est offerte en considérant un sol qui a atteint un état d'équilibre carboné et azoté, pour lequel les quantités de carbone et d'azote sont les suivantes :

$$C_{eq} = \frac{r + s}{\theta} \tag{7}$$

$$N_{eq} = \frac{0 + \omega M}{\gamma} . \tag{9}$$

Le rapport $Q = C_{eq}/N_{eq}$ a pour expressions possibles :

$$Q_{eq} = \frac{\gamma}{\theta} \cdot \frac{r + s}{0 + \omega M} \tag{10}$$

ou bien

$$Q_{eq} = \frac{\alpha_n}{\alpha_n} \cdot \frac{(1 - \omega)}{(1 - \psi)} \cdot \frac{r + s}{0 + \omega M} .$$

Dans un état d'équilibre, l'importance quantitative des transferts demeure constante au cours d'unités de temps successives et en particulier, les quantités de carbone et d'azote minéralisées α_c C et α_n N ; les grandeurs C et N étant également constantes, le rapport $\frac{\alpha_c}{\alpha_n} =$ demeure invariable et

$$Q_{eq} = \frac{1}{k} \cdot \frac{(1 - \omega)}{(1 - \psi)} \cdot \frac{r + s}{0 + \omega M} . \tag{11}$$

Cette relation suggère une interprétation possible de la constance du rapport C/N. En effet, des études effectuées avec ^{15}N ont révélé nettement que la proportion d'azote organisée dans le sol est d'autant plus grande que la quantité d'azote apportée est plus faible (Rémy, 1975). Nous avons également relevé un comportement homologue sur un dispositif parcellaire de très longue durée (Morel, 1976) : à une déficience d'apports d'azote au sol correspond une réorganisation plus grande de l'azote minéralisé (ω augmente). En d'autres termes, tout se passe comme si, dans le cas d'un approvisionnement azoté insuffisant, le système sol-plante réagissait en limitant ses pertes par une réorganisation plus intense de l'azote.

Soit alors, à titre d'exemple, à partir d'une situation d'équilibre, une diminution

---

* Centre de Grignon de l'I.N.A. Paris-Grignon.

des apports carbonés et azotés ; la production végétale diminue, les pertes fléchissent. La somme $y + e$, équivalente à γN tend à s'abaisser. Il en est de même de $0 + \omega M = \gamma N$ (équation 9), alors que ω s'accroît. Par ailleurs, $r + s$ décroît et nous avons des raisons de penser que, dans ce cas ψ augmente ; de plus, la diminution de s est corrélative d'une diminution de 0.

Etant donnée la structure de la relation (11) et dans la mesure où k est peu affecté, la valeur de Q n'accuse que des variations faibles ou éventuellement nulles. Ainsi, la constance du rapport C/N pourrait relever, dans une large mesure, de la faculté que possède le système sol-plante de réagir, en tentant d'en limiter les conséquences, à toute modification des apports de carbone et d'azote au sol. Nous ne pouvons manquer de relever la similitude d'un tel comportement avec celui qui affecte l'évolution de nombreux systèmes physiques ou chimiques sous l'effet d'une action externe et que traduit la règle du déplacement de l'équilibre de Le Chatelier.

6. — Taux de minéralisation du carbone et de l'azote

Les relations (6) et (8) permettent de calculer les taux nets θ et γ au cours d'une période évolutive, connaissant les quantités de carbone et d'azote mises en jeu, et pour γ, la valeur du coefficient ω.

Les taux réels de minéralisation α_c et α_n se déduisent de θ et de γ.

Il est intéressant de comparer les taux nets de minéralisation, ce que nous pouvons faire aisément dans le cas d'un sol en état d'équilibre organique pour lequel nous rappelons les relations :

$$\theta = \frac{r + s}{C} \qquad \gamma = \frac{0 + \omega M}{N} = \frac{0 + a}{N}$$

d'où

$$\frac{\theta}{\gamma} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{r + s}{0 + a} \tag{12}$$

$\frac{r + s}{0 + a}$ représente le rapport des quantités respectives de carbone et d'azote gagnées (ou perdues) par le sol au cours de l'unité de temps ; or, la somme $(r + s)$ est habituellement très supérieure à la quantité $(0 + a)$, de telle sorte que le rapport $\frac{r + s}{0 + a}$ est plus grand que Q ; il en résulte pour θ/γ une valeur nettement plus élevée que 1. Mais nous devons indiquer ici que le rapport θ/γ revêt également une signification particulière : il est aussi une forme d'expression du caractère énergétique des processus de minéralisation, ainsi qu'il sera exposé au paragraphe 8.1.

La différence marquée des valeurs de θ et de γ a une incidence sur le temps de « turn over » qui, selon le taux de référence choisi, est égal à $1/\theta$ ou $1/\gamma$.

7. — Variations dans le temps des taux nets de minéralisation dans un sol en évolution

Lors de l'établissement des relations (6) et (8), nous avons implicitement admis l'hypothèse que les taux θ et γ demeuraient invariables dans le temps. Cette hypothèse, commode, n'est pas exacte. Elle signifierait que les coefficients de réorganisation ψ

et ω du carbone et de l'azote sont exclusivement fonction des taux réels de minéralisation des deux éléments ; en effet,

$$\psi = 1 - \frac{\theta}{\alpha_c} \qquad \omega = 1 - \frac{\gamma}{\alpha_n}.$$

Nous pouvons avoir une estimation de cette variation de θ et de γ en analysant, pour deux états d'équilibre, les relations définissant les valeurs de ces deux taux :

$$\theta = \frac{s + r}{C_{eq}} = \frac{s}{C_{eq}} + \frac{r}{C_{eq}} \tag{13}$$

$$\gamma = \frac{0 + \omega M}{N_{eq}} = \frac{0}{N_{eq}} + \frac{\omega M}{N_{eq}}. \tag{14}$$

Partons d'une situation d'équilibre caractérisée par les taux θ et γ. A la suite d'un changement dans le traitement du sol s'établit un nouvel état d'équilibre auquel correspondent les taux θ_1 et γ_1.

Ainsi que le montrent les relations (13) et (14), les taux θ et γ sont la somme de deux termes : l'un concerne les apports de carbone et d'azote organiques ; l'autre reflète l'influence de la masse racinaire et des apports d'azote minéral.

Dès lors, à la suite d'une modification du traitement du sol, deux cas peuvent être assez nettement discernés :

— Le changement de traitement implique la suppression de tout apport organique carboné et azoté ; du fait de la disparition du premier terme des relations (13) et (14), les taux θ_1 et γ_1 s'établissent à une valeur très nettement inférieure à θ et γ. Cette différence s'accentue si, de plus, les apports d'azote minéral sont fortement abaissés (diminution de M et de r). Ce cas est notamment celui de parcelles cultivées expérimentales maintenues sans aucune fumure pendant de nombreuses années et sur lesquelles les résidus de récoltes sont éliminés : θ et γ fléchissent de façon importante ainsi qu'il sera montré sur un cas concret. Les valeurs de θ et γ calculées par l'application des relations (6) et (8) ne représentent alors que des estimations moyennes pour la période considérée.

— Le nouveau traitement du sol ne comporte de modifications que dans la nature des apports organiques et dans des changements modérés des quantités totales d'éléments fertilisants incorporés au sol : θ et γ accusent alors des variations beaucoup moins importantes que dans le cas précédent. Cette situation peut correspondre, semble-t-il, à celle que l'on rencontre dans une exploitation culturale rationnelle des terres arables.

8. — Approches sur l'évaluation des besoins carbonés des sols en équilibre organique

8.1. — *Expressions des besoins des sols en carbone organique*

Ces besoins s'expriment par la quantité $s + r$, déduite des relations (3), (10) ou (11). La relation (11) permet d'écrire :

$$s + r = kQ_{eq} \frac{1 - \psi}{1 - \omega} (0 + \omega M) \tag{15}$$

équation qui précise les différents facteurs des besoins carbonés des terres arables en état d'équilibre organique :

— le rapport C/N et la valeur k ;
— la quantité d'azote apportée au sol, organique ou minéral ;
— les coefficients ψ et ω de réorganisation du carbone et de l'azote.

Notons en particulier que les besoins en carbone apparaissent d'autant plus grands que la quantité d'azote est elle-même plus élevée.

Les relations (3) et (10) permettent d'exprimer de façons différentes les besoins carbonés d'un sol en équilibre organique. De la relation (3), nous déduisons :

$$s + r = C\theta . \tag{16}$$

C désigne la quantité totale de carbone organique du sol et θ le taux net annuel de minéralisation du carbone. Ce taux est différent selon les conditions pédoclimatiques et culturales auxquelles le sol est soumis. Sa connaissance permettrait d'évaluer aisément les besoins carbonés du sol concerné.

La quantité $s + r$ peut également s'exprimer en fonction des quantités d'azote du sol. En effet, nous avons noté l'invariance du rapport $Q = C/N$ pour des situations fort diverses. L'équation (16) peut s'écrire :

$$s + r = Q\theta N . \tag{17}$$

Cette relation précise les besoins carbonés en fonction du taux net annuel de minéralisation du carbone, de la quantité totale d'azote organique contenue dans le sol et du rapport C/N.

Nous pouvons aussi calculer la quantité $s + r$ d'après les apports d'azote au sol par unité de temps. De l'équation (10) nous déduisons :

$$r + s = Q \frac{\theta}{\gamma} (0 + \omega M)$$

Le terme $0 + \omega M$ exprime la quantité d'azote organique introduite ou édifiée dans le sol au cours de l'unité de temps choisie ; dans un état d'équilibre, une quantité égale est minéralisée, ayant pour valeur γN. Le terme $Q \frac{\theta}{\gamma}$ peut s'écrire :

$$Q \frac{\theta}{\gamma} = \frac{r + s}{0 + \omega M} = C_v . \tag{18}$$

La grandeur C_v apparaît comme la quantité de carbone dépensée dans le sol pour assurer l'ensemble des transformations biochimiques affectant l'*unité de masse* d'azote organique introduite ou édifiée dans le sol au cours de l'unité de temps. Les besoins carbonés du sol ont ainsi pour valeur :

$$s + r = C_v(0 + \omega M) . \tag{19}$$

Cette relation signifie simplement que les besoins carbonés d'un sol en équilibre sont égaux à la quantité d'azote organique qui disparaît par unité de temps, $(0 + \omega M)$, multipliée par la quantité C_v de carbone nécessaire pour assurer l'évolution biochimique complète de l'unité de masse d'azote organique du sol.

Observons que les masses de carbone mises en jeu peuvent être traduites en quantités d'énergie en prenant pour référence l'énergie dissipée par la combustion complète du carbone.

L'expression (18) précisant la grandeur de C_v montre que, pour des apports de carbone et d'azote équivalents, la quantité d'énergie nécessaire pour assurer l'évolution biochimique de l'unité de masse d'azote est d'autant plus grande que la réorganisation de l'azote (ω) est plus faible. Inversement, à une augmentation de ω correspond une diminution de C_v : la réorganisation de l'azote dans le sol apparaît ainsi comme un processus conduisant à une économie d'énergie dans le « fonctionnement » biochimique du sol. Cette économie est rencontrée en particulier dans les sols ne recevant que de faibles apports azotés, pour lesquels la valeur de ω est élevée (Rémy, 1975; Morel, 1976). Notons enfin que le rapport θ/γ des taux nets de minéralisation du carbone et de l'azote exprime aussi une quantité d'énergie égale à C_v/Q, la valeur Q étant constante.

8.2. — *Apports de carbone organique au sol*

Les apports en carbone nécessaires par unité de temps pour assurer l'équilibre organique du sol, représentés par s, sont donnés par l'une ou l'autre des expressions suivantes, déduites des équations (16), (17), (18) :

$$s = C\theta - r \tag{20}$$
$$s = Q\theta N - r \tag{21}$$
$$s = C_v(0 + \omega M) - r \tag{22}$$

Les premiers termes des seconds membres des trois équations sont équivalents ; notons en particulier que dans la relation (22), le paramètre ω apparaît explicitement. Par ailleurs, soulignons que la quantité r désignant le carbone des racines demeure très étroitement associée à la valeur de ω. En effet, si r et N_r désignent respectivement les quantités de carbone et d'azote contenues dans les racines et Q_r le rapport C/N de celles-ci, nous avons :

$$r = Q_r N_r .$$

Or, N_r représente une partie importante de la masse d'azote de la fraction vivante du sol (fig. 2, compartiment l) ; cette masse, dans l'unité de temps considérée, a pour valeur :

$$a + d = \omega(M + c + 0)$$

relation qui situe bien l'incidence du paramètre ω dans l'expression de r.

Remarque :

Les propositions énoncées dans ce paragraphe laissent sous-entendre que les besoins carbonés des sols ne sont associés, au plan des éléments chimiques, qu'à l'ampleur des apports azotés. Il est certes évident que le carbone et l'azote se situent au cœur de l'élaboration de la matière vivante. Au point de vue biochimique, la vie s'installe inéluctablement dans l'environnement structural parfaitement ordonné de l'atome d'azote, environnement auquel le carbone apporte tout à la fois les pièces maîtresses de l'édifice moléculaire et son indispensable concours énergétique. Aussi n'est-il pas surprenant qu'une corrélation puisse exister entre les besoins en carbone et les quantités d'azote disponibles pour l'ensemble de la micropopulation hétérotrophe du sol.

Toutefois, cette corrélation au niveau cellulaire n'implique pas nécessairement pour tous les sols un rapport constant entre les quantités d'azote mises en jeu et les besoins en carbone, ce qui se traduirait par une invariance de C_v. Certaines caractéristiques des sols, comme le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, sont susceptibles, par leurs variations, de modifier la nature de la micropopulation ainsi que l'orientation métabolique propre de plusieurs des espèces qui la constituent ; il en résulte des valeurs différentes de C_v (cf. tabl. 2 et 3, p. 372 et 374).

Par ailleurs, la croissance des micro-organismes du sol est liée à la présence d'autres éléments chimiques comme le phosphore, le soufre, le magnésium, les oligo-éléments... L'insuffisance de l'un ou de plusieurs d'entre eux pourrait, par exemple, devenir un facteur limitant du développement de la micropopulation et, par là, des besoins en carbone.

9. — Applications

Nous appliquerons ci-après quelques-unes des idées exprimées dans ce mémoire aux sols de deux dispositifs de longue durée :

— le dispositif de Halle (République Démocratique Allemande) ;

— le dispositif Dehérain du Centre de Grignon.

9.1. — *Dispositif de Halle*

Créé en 1878 et conduit en culture continue de seigle, le champ d'essais de Halle comprend, entre autres, les traitements suivants (Schmalfuss et Kolbe, 1961 ; Welte et Timmermann, 1976) :

— fertilisation au fumier d'étable (12 t par ha et par an) ;

— fertilisation aux engrais minéraux NPK (par ha et par an : N 40 kg ; P_2O_5 56 kg ; K_2O 90 kg) ;

— aucune fertilisation.

Les pailles sont éliminées après la récolte.

Les sols de ce dispositif offrent le comportement exceptionnel d'avoir atteint leur équilibre organique après 40 années pour les trois types de traitements précités.

Le tableau 1 reproduit un extrait des résultats obtenus.

TABLEAU 1

Dispositif de Halle : teneurs des sols en carbone et azote (p. 1 000)

The Halle Experiment : Carbon and nitrogen contents of soils (p. 1 000)

Traitements (Treatments)	Teneurs en carbone (Carbon contents)			Teneurs en azote (Nitrogen contents)			Rapport C/N (Ratio C/N) (1958)
	1878	1953	1958	1878	1953	1958	
Fumier (Farmyard manure)	12,4	16,8	16,9	0,95	1,25	1,32	12,8
Fumier + NPK (Farmyard + NPK).	12,4	12,6	12,6	0,95	0,95	0,94	13,4
Sans fumure (Unmanured)	12,4	11,2	11,4	0,95	0,86	0,85	13,4

Le tableau 2 présente quelques-unes des grandeurs caractéristiques évoquées dans la partie générale de ce mémoire. N'ayant pour le complexe pédoclimatique et cultural concerné aucune indication sur des valeurs possibles du coefficient ω, nous avons effectué les calculs avec trois valeurs : 0,3-0,4-0,5. Rappelons simplement que les valeurs de ω sont d'autant plus élevées que les sols ne reçoivent aucune fertilisation ou bien une fumure azotée relativement faible.

TABLEAU 2

Dispositif de Halle. Valeurs caractéristiques relatives au carbone et à l'azote

The Halle Experiment : Characteristic values related to the Carbon and the nitrogen of the soil

Traitements (Treatments)	Taux net de minéralisation du carbone (Net rate of carbon mineralization) $\theta \times 100$		Valeurs de ω choisies (Choozen values for ω)	Taux net de minéralisation de l'azote (Net rate of nitrogen mineralization) $\gamma \times 100$ 1958 (équilibre) (balance)	Rapport θ/γ à l'équilibre (Ratio θ/γ at the balance)	Valeur de $C_v = Q\frac{\theta}{\gamma}$
	Période 1879-1923 (déséquilibre) (Unbalance)	Période 1924-1953 (équilibre) (balance)				
Fumier ..... (Farmyard)	4,0	4,1	0,3	1,52	2,70	34,6
			0,4	1,56	2,63	34,0
			0,5	1,60	2,56	32,8
NPK (NPK)	3,0	2,6	0,3	0,50	5,20	69,9
			0,4	0,67	3,88	52,4
			0,5	0,83	3,13	42,0
Sans fumure * .. (Unmanured)	2,1	1,3	0,4	0,31	4,19	57,3
			0,5	0,33	3,94	52,6
			0,6	0,39	3,33	48,6

* Ces valeurs ne constituent que des indications (voir texte). These values are only indications (see the text).

Nous avons estimé le poids des chaumes et autres résidus aériens après la récolte à 1/5 du poids des pailles ; le poids des racines a été évalué à 30 p. 100 de la somme (grain + paille). Nous avons par ailleurs considéré que les chaumes, les racines et le fumier contenaient respectivement 45, 35 et 36 p. 100 de carbone par rapport à la matière sèche ; l'azote ammoniacal du fumier est représenté pour 15 p. 100 de l'azote total. Nous avons estimé à 7 kg par ha et par an la quantité d'azote apportée par les pluies. La fixation non symbiotique est supposée compenser les pertes d'azote par dénitrification sauf dans le cas des parcelles sans fertilisation pour lesquelles nous considérons qu'un léger reliquat persiste dans le sol (5 kg/ha/an).

En ce qui concerne les parcelles sans fumure, nous devons souligner que les valeurs estimées des apports et des pertes d'azote sont très imprécises ; aussi, les résultats calculés ne peuvent-ils être retenus que comme des valeurs indicatives. Par ailleurs, et cela plus particulièrement pour les traitements sans apport organique, notons que la valeur de ω se réfléchit de façon importante sur la quantité C_v.

Nous remarquons sur le tableau 2 l'évolution différente du taux net de minéralisation du carbone pour les traitements « fumier » et « NPK » d'une part, les parcelles

sans aucune fumure d'autre part. Dans le premier cas, θ est peu différent pour la période d'évolution du sol (1879-1923) et la période d'équilibre ; dans le second cas, la suppression de tout apport organique et minéral a pour effet un fléchissement marqué de θ (§ 7).

En ce qui concerne les valeurs relatives des taux nets de minéralisation et des quantités C_v, l'observation des résultats laisse apparaître une différence très marquée : les taux nets de minéralisation du carbone et de l'azote accusent des écarts importants pour les trois types de traitements : de 1 à 3 ou 5 pour la situation d'équilibre, seule considérée. Par contre, le rapport θ/γ et, en conséquence la quantité C_v varient dans des limites beaucoup plus faibles, même si les coefficients ω sont choisis assez différents.

Dans les parcelles recevant uniquement du fumier, le rapport θ/γ se situe entre 2,5 et 3. Il apparaît plus élevé dans le cas des parcelles « NPK » : entre 3 et 5 ; cela tient essentiellement au fait que les transferts d'azote organique par unité de temps sont relativement modérés, ne pouvant concerner que les quantités organisées aux dépens du seul azote minéral apporté (ωM).

Les valeurs de C_v correspondantes se placent au niveau moyen de 34 kg pour les parcelles « fumier », ce qui équivaut à une énergie de l'ordre de 270 000 kcal.

9.2. — *Dispositif de Grignon* (Parcelles Dehérain)

Implanté en 1875, ce dispositif d'essais de longue durée du Centre de Grignon comprend, sur 97 parcelles cultivées ou non, divers types de traitements qui sont les suivants (Dehérain, 1876 ; Morel, Chabouis, Bourgeois, 1976) :

— sans aucune fumure depuis 1875, 1902, 1931 ;

— avec fumure exclusivement minérale complète ou privée de l'un des éléments N, P ou K ;

— avec fertilisation au seul fumier d'étable ;

— avec fumure mixte, minérale et organique ;

— sans aucune fertilisation de 1902 à 1964 et, depuis cette dernière date, fumure minérale complète.

Pour l'ensemble de ces traitements, excepté pour le traitement mixte (fumier + NPK), les taux de carbone et d'azote organiques diminuent encore, révèlant ainsi qu'un état d'équilibre n'est pas atteint.

Nous avons calculé (relations 6 et 8) les valeurs de θ et de γ pour la période 1938-1972 (tabl. 3). En ce qui concerne les parcelles sans fumure et sans incorporation d'azote minéral, nous avons tenu compte de ce que les apports par les pluies et la fixation non symbiotique représentaient respectivement 7 et 5 kg d'azote par ha et par an ; toutefois, cette dernière donnée étant une estimation, les valeurs de θ et de γ ne peuvent être qu'indicatives (cf. § 9.1). Remarquons cependant que ces valeurs demeurent très voisines de celles obtenues par une démarche sensiblement différente (Morel, 1976).

Calculé pour une période de déséquilibre organique s'étendant sur une durée de 35 années, le rapport θ/γ se révèle supérieur à l'unité pour tous les traitements : il se situe au voisinage de 2 (parcelles sans fumure) ou bien à une valeur sensiblement supérieure pour les parcelles recevant une fumure complète (tabl. 3).

TABLEAU 3

Valeurs caractéristiques de la minéralisation de la matière organique du sol (Dispositif Dehérain, Grignon)

Characteristic values of the soil organic matter mineralization (Dehérain Experiment, Grignon)

Traitements (Treatments)	$\theta \times 100$	ω	$\gamma \times 100$	$\alpha_n \times 100$	θ/γ	Rapport (*Ratio*) C/N (2)		C_v
						1938	1972	
Sans fumure depuis 1875	1,61	0,3	0,77	1,10	2,09	8,8	8,7	18,3
(Unmanured since 1875)		0,4	0,79	1,32	2,04			17,8
		0,5	0,81	1,62	1,99			17,4
Sans fumure depuis 1902	1,67	0,3	0,73	1,04	2,29	8,7	8,7	19,9
(Unmanured since 1902)		0,4	0,74	1,24	2,25			19,6
		0,5	0,76	1,50	2,20			19,1
Sans fumure depuis 1931	2,03	0,3	1,06	1,51	1,92	8,7	9,0	17,0
(Unmanured since 1931)		0,4	1,08	1,80	1,88			16,6
		0,5	1,09	2,18	1,86			16,5
Fumure minérale NPK depuis 1902	3,06	0,3	1,09	1,56	2,81	8,7	8,8	24,6
(NPK fertilizers since 1902)		0,4	1,32	2,20	2,32			20,3
		0,5	1,54	3,08	1,99			17,4
Fumure minérale NK depuis 1929	2,44	0,3	1,19	1,70	2,05	8,6	8,8	17,8
(NK fertilizers since 1929)		0,4	1,41	2,35	1,73			15,1
		0,5	1,63	3,26	1,50			13,0
Fumure minérale PK depuis 1929.	2,16	0,3	0,89	1,27	2,43	8,7	8,9	21,4
(PK fertilizers since 1929)		0,4	0,90	1,51	2,39			21,0
		0,5	0,92	1,84	2,35			20,7
Fumure minérale NP depuis 1929.	2,64	0,3	1,26	1,80	2,10	8,7	8,8	18,4
(NP fertilizers since 1929)		0,4	1,47	2,45	1,80			15,7
		0,5	1,68	3,36	1,57			13,7
Fumier d'étable depuis 1929	4,35	0,3	1,72	2,46	2,53	8,8	9,4	23,0
(Farmyard manure since 1929)		0,4	1,81	3,02	2,40			21,8
		0,5	1,91	3,82	2,28			20,7
Fumure « fumier + NPK » depuis 1965 (1)	4,53	0,3	1,52	2,17	2,98		9,3	27,6
(Farmyard manure + NPK fertilizers since 1965)		0,4	1,62	2,70	2,80			26,0
		0,5	1,72	3,44	2,63			24,4

(1) Sol en état d'équilibre organique (Soil in a state of organic balance).
(2) Le rapport C/N choisi pour calculer C_v est la moyenne des valeurs trouvées en 1938 et 1972.

Les taux θ et γ étant susceptibles de varier au cours d'une période de déséquilibre (cf. § 7), le rapport θ/γ indiqué ne représente pas nécessairement celui qui caractériserait, à l'équilibre, les processus de minéralisation : il ne peut donc servir au calcul de C_v dont l'expression se rapportant à l'état d'équilibre est donnée par $C_v = Q\frac{\theta}{\gamma}$. Ce calcul de C_v peut être cependant proposé (tabl. 3), permettant d'établir un classement des différents traitements selon ce critère énergétique. Q étant invariable, ce classement demeure le même que celui qui correspondrait aux sols en état d'équilibre organique. Nous observons alors que la valeur de C_v est la plus grande pour les parcelles fertilisées, quelle que soit la valeur de ω. Tout se passe donc comme si la fertilisation des sols conduisait à une augmentation des besoins énergétiques rapportés à

l'unité de masse d'azote : sous cet aspect, un sol fertilisé « fonctionne » moins économiquement qu'un sol maintenu sans fumure.

Un examen plus attentif de ce comportement concerne l'observation de trois groupes de parcelles recevant une fertilisation complète, bien que de nature fort différente : les parcelles recevant une fumure exclusivement minérale NPK et celles fertilisées au seul fumier d'étable d'une part, les parcelles bénéficiant d'une fumure mixte organique et minérale, d'autre part. Ces dernières reçoivent la même quantité de fumier que les précédentes ainsi qu'une légère fertilisation minérale complémentaire permettant d'atteindre le même niveau de fumure que les parcelles NPK ; en ce qui concerne l'azote minéral apporté, cette fumure complémentaire est en général légèrement inférieure à 30 kg par ha et par an.

Alors que dans les deux premiers groupes de parcelles, les taux de carbone et d'azote du sol continuent à s'abaisser, la diminution est enrayée pour les parcelles recevant du fumier et une fertilisation minérale complémentaire : il semble qu'un niveau d'équilibre soit atteint ainsi que le révèlent des analyses récentes, mais qu'il conviendra de vérifier dans le cours des prochaines années.

Ainsi, un apport très modéré d'azote minéral au fumier s'est montré suffisant pour stabiliser quantitativement l'évolution de la matière organique. Soulignons ici que ce résultat n'est imputable à aucune addition au sol de substance organique, humifiée ou non ; il signifie en d'autres termes que l'apport d'azote minéral a augmenté le « rendement apparent » du fumier dans l'élaboration des substances organiques du sol.

Pour les trois groupes de parcelles précités, et dans la mesure où il est possible de comparer une situation de déséquilibre organique à un état d'équilibre, nous remarquons que les rapports θ/γ sont sensiblement du même ordre de grandeur, ainsi que les valeurs de C_v. Peut-être pouvons-nous cependant avancer, d'une façon très prudente, que la fumure mixte, qui apparaît comme la plus intéressante au plan de l'entretien organique du sol, serait aussi celle qui sollicite le plus d'énergie pour assurer l'évolution de l'unité de masse d'azote ; mais des observations réalisées dans d'autres sites sont évidemment nécessaires pour corroborer — ou infirmer — cet aspect particulier de la dynamique du carbone et de l'azote.

Remarquons, ainsi que nous l'avons déjà observé (cf. § 9.1), que les variations de la valeur de ω ont une incidence plus marquée sur le rapport θ/γ lorsqu'aucun apport d'azote organique n'est effectué ; inversement, l'influence de ω est très nettement estompée lorsqu'une fraction notable de l'azote est incorporée sous forme organique, ce qui est le cas le plus fréquent dans les techniques culturales habituelles. En ce qui concerne le traitement « fumier + NPK », le rapport θ/γ se situe entre 2,6 et 3,0 ; pour une valeur moyenne de 2,8, C_v égale 26 kg, équivalents à une énergie de 200 000 kcal environ.

Ces rapports θ/γ apparaissent du même ordre de grandeur que ceux qui ont été calculés pour le dispositif de Halle. Par contre, au plan énergétique, les valeurs de $C_v = Q\frac{\theta}{\gamma}$ se révèlent nettement plus basses à Grignon qu'à Halle. L'écart observé tient essentiellement à la différence des rapports C/N entre les sols des deux sites. Il serait souhaitable que cette constatation fut confirmée dans d'autres essais de longue durée pour des sols ayant atteint leur état d'équilibre organique : elle signifierait d'une part que le rapport θ/γ du taux net de minéralisation du carbone et de l'azote varie

assez peu selon le lieu considéré, d'autre part que l'évolution biochimique de l'unité de masse d'azote sollicite plus d'énergie lorsque le rapport C/N est élevé. Il résulterait de cette dernière remarque que dans le cas où la quantité $r + s$ demeure sensiblement constante, la quantité d'azote à incorporer au sol pour assurer l'équilibre organique est d'autant plus faible que le rapport C/N est plus grand puisque nous avons la relation :

$$0 + \omega M = \frac{r + s}{C_v}.$$

Ainsi, les sols du dispositif de Halle, dont le rapport C/N est de l'ordre de 13, assurent-ils leur équilibre organique avec des incorporations d'azote relativement modérées. Il est également tentant de reporter ces observations sur les sols forestiers, aux rapports C/N élevés, et qui ne reçoivent que des apports extérieurs d'azote très limités.

Remarque.

La quantité C_v, calculée pour un état d'équilibre, est étroitement dépendante de l'estimation des apports carbonés au sol ; en particulier, elle peut varier dans une assez large mesure avec l'évaluation des masses racinaires édifiées au cours du développement de la plante. Les valeurs indiquées dans ce mémoire se réfèrent aux déterminations habituellement réalisées à la fin de la croissance. Or, du semis à la récolte, des radicelles, des poils absorbants se sont formés puis sont morts après avoir assumé leurs fonctions. Ainsi, Sauerbeck et Johnen (1977), utilisant le traceur ^{14}C sur des cultures en vases de végétation, trouvent que la production totale de substances organiques racinaires par l'orge est trois à quatre fois plus grande que les quantités de racines déterminées au moment de la moisson. Si nous acceptons que ces données nouvelles puissent être appliquées sans modification à des cultures de céréales en plein champ, les résultats présentés dans cette note se trouvent très nettement majorés. Ainsi, la valeur C_v, calculée pour les parcelles « fumier + NPK » du dispositif Dehérain (9.2) serait voisine de 50 kg de carbone par kilogramme d'azote pour un coefficient $\omega = 0{,}3$. A cet accroissement correspondrait également une augmentation du rapport θ/γ des taux nets de minéralisation du carbone et de l'azote (6) : de 3, il s'élèverait à des valeurs de l'ordre de 5.

Enfin, cette nouvelle estimation des masses racinaires aurait également des répercussions sur l'importance quantitative des transferts de carbone dans le sol (fig. 1).

10. — Conclusions

L'établissement d'un modèle sur les transferts biochimiques du carbone dans le sol permet de préciser les facteurs qui conditionnent ces transferts et d'aborder l'aspect quantitatif de l'évolution de l'élément dans le temps. De même que pour l'azote, déjà étudié, le modèle compartimental proposé est très simple ; toute complication conduit en effet à introduire de nouveaux paramètres auxquels il est difficile d'accéder par voie expérimentale. Dans le cas du carbone, les relations données permettent, par des méthodes usuelles d'analyse, une estimation du taux net annuel de minéralisation du carbone organique pour un sol qui n'a pas atteint son état d'équilibre.

La constance observée du rapport C/N dans les terres arables offre un moyen simple d'expliciter les liaisons étroites qui existent entre les évolutions simultanées du carbone et de l'azote dans le sol : il suffit en effet d'associer les deux modèles concernés. Cette association de modèles correspondant à des éléments chimiques différents d'un même système constitue une méthode d'approche fructueuse pour l'étude des relations d'interdépendance entre les multiples transferts dont le sol est le siège. Elle permet en particulier, pour le cas qui nous préoccupe, d'aborder l'aspect énergétique de l'évolution de l'azote dans le sol.

Enfin, les aspects théoriques développés dans ce mémoire ouvrent des perspectives d'application aux problèmes techniques et notamment à ceux qui concernent l'entretien de la matière organique dans les sols cultivés.

Reçu pour publication en octobre 1978.

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Messieurs Catroux et Rémy pour les remarques judicieuses qu'ils nous ont faites ainsi que pour la possibilité qu'ils nous ont offerte d'avoir de fructueuses discussions sur le sujet traité.

Summary

Some new aspects of carbon and nitrogen dynamics in the soil

In this report we present two compartments models on the respective transfers of carbon and nitrogen in the soil. The states of organic equilibrium and unbalance of the soil are dealt with, which leads to expressions of the same mathematical form. The quantities of organic carbon and nitrogen present in the soil at time t depend in particular on the net mineralization rates of each of these two elements and moreover as far as nitrogen is concerned on the fraction of mineralized nitrogen which reorganizes itself in the microorganisms and the root mass.

The relations described precise the main factors determining the soil contents in organic carbon and nitrogen. They allow to explain the simultaneous evolution of both elements in soil by taking into account the C/N ratio.

A suggestion is made for one of the possible causes of the invariability of the C/N ratio observed under given pedoclimatic conditions : it might be due, at least in part, to the soil reaction towards any change in carbon and nitrogen supply as it is the case for numerous physical or chemical systems ; we know for instance that a deficiency in nitrogen supply leads to a more intense reorganization of the mineralized nitrogen.

A comparative study reveals that the net mineralization rate of carbon is higher than the nitrogen one ; these rates may vary according to time and sometimes to a great extent when the amount of carbon and nitrogen added to the soil is changed.

The stated relations stress the interest of associating the informations on the respective evolutions of carbon and nitrogen in any study relative to the fate of soil organic matter ; they allow in particular to tackle under a new angle the problem of the needs in carbonaceous substances of soils presenting an organic equilibrium either in relation to the total amount of carbon or nitrogen contained in this soil or in relation to the mineral and organic nitrogen fertilization. In the latter case the needs in carbon of a soil in equilibrium are equal to the amount of organic nitrogen which disappears in a time unit multiplied by the amount of carbon C_v (or energy) necessary to secure the complete biochemical evolution of the mass unit of soil organic nitrogen. The quantity C_v can be expressed by the relation : $C_v = Q\frac{\theta}{\gamma}$ in which Q corresponds to the C/N ratio, $\frac{\theta}{\gamma}$ the ratio between the net mineralization rates of carbon and nitrogen.

The proposals dealt with in this report are applied to some results obtained on long-term experiments. Let us note in particular that the ratio generally varies between 2,5 and 3,0 under rather different pedoclimatic and cultural conditions. The quantity C_v as compared to 1 kg of organic nitrogen ranges from 25 to 30 kg for the loamy soils of the Paris area which is equivalent to an energy

of about 200 000 kcal. C_v value increases when the C/N ratio rises. It remains that this typical value, a function of the carbon supply in soil, must be largely increased if according to new estimations the roots formed during plant growth correspond to a much more important mass than that usually considered.

It can be lastly deduced from this study that in comparison with unmanured soils the fertilization of crops would induce an increase of the needs in energy during the biochemical processes of the mineralization.

Zusammenfassung

Einige neuen Gesichtspunkte über die Dynamik von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden

In diesem Bericht stellen wir zwei Abteilmodelle auf die jeweiligen Transporte von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden vor. Die Gleichgewichts und Ungleichgewichtszustände sind behandelt, was zu Formeln des gleichen mathematischen Ausdrucks führt, welche die die im Boden vorhandenen Mengen beider Elemente bestimmenden Faktoren genau angeben ; zur Zeit thängen diese Mengen insbesondere von den Nettomineralisierungssätzen jedes dieser Elemente und, was Stickstoff betrifft, auch von dem Teil des mineralisierten Stickstoffs ab, der sich in den Mikroorganismen und Wurzelmasse reorganisiert.

Die festgestellten Beziehungen un Anbetracht von K/S Verhältnis es ermöglichen, die gleichzeitige Entwicklung des Kohlenstoffs und Stickstoffs deutlich auszudrücken. Eine Deutung der in Ackerböden allgemein beobachteten Stetigkeit des K/S Verhältnisses ist vorgebracht.

Eine Vergleichsuntersuchung zeigt dass der Nettomineralisierungssatz des Kohlenstoffs höher als dieser des Stickstoffs ist ; diese Sätze können mit der Zeit variieren, wenn die im Boden zugesezten Mengen beider Elemente geändert sind.

Die Zusammenstellung der Modelle bezüglich Kohlenstoff und Stickstoff ermöglicht es, die Untersuchung von der Entwicklung der organischen Substanz des Bodens unter dem Gesichtspunkt der Energie zu beginnen : der Kohlenstoffbedarf eines im Gleichgewichtszustand sich befindenden Bodens gleicht der Menge von organischem Kohlenstoff, die pro Zeiteinheit verschwindet multipliziert durch die Menge C_v von Kohlenstoff (oder Energie), die nötig ist, um die ganze biochemische Entwicklung der Masseneinheit von organischem Stickstoff sicherzustellen.

Die in diesem Bericht beschriebenen Vorschläge sind auf einige auf sehr langfristigen Untersuchungsanlage erzielten Ergebnisse angewandt ; C_v Werte ebenso wie die Nettomineralisierungsätze von Kohlenstoff und Stickstoff sind gegeben.

РЕЗЮМЕ

Некоторые новые аспекты динамики углерода и азота в почве.

Р. МОРЕЛЬ.

В данной работе представлены две модели с отделениями, соответствующие последовательным перемещениям угдерода и азота в почве. Рассматриваются состояния равновесия и неуравновешенности, приводящие к выражению одной и той-же математической формы и уточняющие факторы способные определить количества обоих элементов в почве ; в момент t количества эти зависят от чистого процента минерализированных количеств каждгоо из элементов, а, кроме того, в случае азота, от той части минерализированного азота которая реорганизуется в микроорганизмах и в корневой массе.

Связи, установленные при помощи соотношения С/И, позволяют об'яснить одновременность эволюции углерода и азота. Предлагается интерпретация постоянности соотношения С/И набдюдающейся обычно в пахотных почвах.

Сравнительное изучение показывает, что чистый процент минерализации углерода превышает чистый процент минерализации азота ; эти процентные количества могут меняться во времени, при изменении количеств обоих элементов внесенных в почву. Об'единение моделей, относящихся к углероду и азоту, позволяет приступить к изучению энергетического аспекта эволюции органического вещества почвы : нужды уравновешенной почвы в углероде равны количеству органического азота исчезающего за единицу времени, умноженному на количество C_v углерода (или энергии) необходимого для полной биохимической эволюции единицы массы органического азота.

Предложения, развитые в данном труде, применяются к некоторым результатам полученным в долговременных экспериментах ; указываются, кроме того, величины C_v и чистые процентные количества минерализированных углерода и азота.

Références bibliographiques

DEHÉRAIN, 1876. Station agronomique de Grignon. Cultures du champ d'expériences. *Ann. agron.*, **2,** 117.

JENKINSON D. S., RAYNER J. H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, **123** (5), 298-305.

LINDEMANN Y., 1977. Caractérisation de l'hétérogénéité des répartitions de l'azote nitrique en sol nu. *C. R. Ac. Agric.*, Paris, **13,** 915-924.

MOREL R., 1968. Evolution de l'azote et du carbone organiques du sol au cours d'une expérience de longue durée. *Ann. agron.*, **19,** 153-174.

MOREL R., 1971. Evolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol. *Science du Sol*, **1,** 121-129.

MOREL R., 1976. Utilisation des résultats obtenus sur des essais de longue durée dans l'étude des transferts de l'azote dans le sol. *Ann. agron.*, **27,** 567-582.

MOREL R., CHABOUIS C., BOURGEOIS S., 1976. Quelques résultats expérimentaux obtenus sur le champ Dehérain, *Ann. agron.*, **27,** 855-879.

RÉMY J. C., 1975. Etude sur le devenir des engrais azotés en sol de limon du Bassin Parisien. *C. R. de fin d'étude d'une recherche financée par la D.G.R.S.T.*, Annexe 21, 128-142.

SAUERBECK D. R., JOHNEN B. G., 1977. Root formation and decomposition during plant growth. *Soil Organic Matter Studies. Proc. of Symposium Braunschweig* 6-10 sept. 1976, vol. I, 141-148.

SCHMALFUSS K., KOLBE G., 1961. Der « Ewige Roggenbau » in Halle nach 80 Jahren. *Wiss. Z. Univ. Halle, math. nat.* × 2/3 S, 425-430.

STEINECK O., RUCKENBAUER P., 1976. Results of a 70 years long-term rotation and fertilization experiment in the main cereal growing aera of Austria. *Ann. agron.*, **27,** 803-818.

TIMMERMANN F., WELTE E., 1976. Sur la fertilisation du sol et le bilan d'azote de l'essai permanent de fumure « Ewiger Roggenbau » (culture continue de seigle à Halle/Saale). *Ann. agron.*, **27,** 703-719.

Ann. agron., 1978, **29** (4), 381-403.

Essai d'une méthodologie d'étude de l'évolution de quelques caractéristiques de la couche arable sur un dispositif expérimental avec rotations

J. L. CHARPENTEAU et J. P. RELLIER *

Laboratoire de Biométrie,
** Station d'Agronomie,*
Centre de Recherches de Toulouse, I.N.R.A.,
Auzeville, B.P. 12, 31320 Castanet-Tolosan

Résumé

Les conséquences sur l'état du sol de la conduite d'un système de culture peuvent être en partie appréhendées par les analyses de terres. Nous étudions par une méthodologie statistique les données recueillies à sept ans d'intervalle sur le dispositif avec rotations d'Auzeville.

Nous abordons trois problèmes : 1) la fiabilité de nos données relativement aux échantillonnages et aux techniques d'analyses ; 2) la caractérisation de la couche arable par quelques critères simples ; 3) l'effet de différentes rotations sur l'évolution de la valeur des analyses de terre, qui constitue l'objet principal de l'étude.

Notre étude est centrée sur un modèle de variabilité spatiale :

[sol 75] = [sol 69] + f (rotation, irrigation, précédent cultural, interactions) + erreur.

Le choix des variables à expliquer [sol 75] passe par la réponse au point 1). Aucune variable n'est rejetée.

La définition du terme [sol 69] sous forme de deux covariables (p. 100 argile + p. 100 limons) et (test S) est réalisée par une analyse en composantes principales et une analyse factorielle discriminante et aide à répondre au point 2).

Le point 3) est abordé par l'étude de l'effet Rotation du modèle (analyse factorielle discriminante) : en regard d'une certaine stabilité de la partie « Etalon agronomique » du dispositif, les rotations à tendance céréalière et les rotations à tendance fourragère se discriminent par l'évolution de la matière organique et de la stabilité structurale.

Ces résultats demandent à être prolongés par l'étude de données d'autres natures (les notations sur le travail du sol en particulier) pour mieux apprécier l'impact du système de culture sur l'état du sol.

Introduction

Dans le choix d'un système de culture, en plus de l'aspect économique (meilleure efficience des facteurs de production) il devrait être tenu compte des aspects agronomiques, en particulier la conservation ou l'amélioration du milieu-sol.

Un problème abordé notamment par le groupe INRA « Méthodologie d'étude des Systèmes de cultures » ([1]) est alors de savoir juger l'état et les propriétés d'un sol, dans l'absolu ou comparativement.

([1]) Comptes rendus des réunions disponibles à la Station d'Agronomie de Toulouse.

1) La production de matière sèche peut servir de révélateur d'une certaine évolution des propriétés du sol, soit directement (richesse en éléments nutritifs), soit par l'intermédiaire de la densité de peuplement (Boiffin et Sebillotte, 1975), soit par l'intermédiaire de l'enracinement (Maertens et Studer, 1963 ; Maertens, 1964) ; la difficulté tient ici à la comparaison d'espèces différentes n'ayant pas le même potentiel de production. Par ailleurs, l'observation d'une diminution de production, qui peut être due à l'action d'autres facteurs que la dégradation du sol (interaction avec le climat par exemple), ne permet pas d'en détecter la cause (évolution de tel ou tel aspect des propriétés du sol).

2) On peut aussi, pour juger l'état du sol, l'observer directement,

— soit par les notations sur le comportement du sol, dans un état relativement stabilisé ou après le passage d'outils. Elles peuvent être effectuées sur la couche superficielle ou un profil plus épais. Elles peuvent éventuellement avoir trait à la qualité du travail réalisé. Mais ces données sont très laborieuses à recueillir et pas toujours faciles à quantifier ;

— soit par des déterminations physico-chimiques, hydriques, biologiques réalisées sur un échantillon de la couche arable. L'inconvénient est dans ce cas de ne prendre en compte que la couche arable c'est-à-dire une partie seulement des conséquences sur le sol de la conduite d'un système de culture et d'avoir une image tronquée de la condition de milieu-sol dans laquelle évolue le système de culture.

En ce qui concerne le dispositif expérimental avec rotations d'Auzeville, ces considérations d'une part, la disponibilité des données d'autre part, nous ont amenés à choisir les analyses de terre comme première approche du jugement de l'état des sols sous différentes rotations sachant par avance que les résultats seront complétés voire expliqués par les données concernant le travail du sol et la production des cultures.

Nous avions, au départ, trois problèmes à résoudre, rejoignant les préoccupations du groupe « Méthodologie d'étude des systèmes de cultures » :

1) La qualité de l'échantillonnage sur le terrain et la qualité de la technique d'analyse de terre sont-elles suffisantes pour que les valeurs obtenues représentent bien l'état d'un sol ? Ou, au contraire, les prélèvements et mesures sont-ils imparfaits à un point tel qu'il est illusoire de vouloir mettre en évidence des faits significatifs ?

2) Est-il possible de caractériser un sol (du moins les trente premiers centimètres) par un critère fixe (c'est-à-dire le même au cours du temps) et d'utilisation plus simple que la lecture de l'ensemble des déterminations faites sur ce sol ? En d'autres termes, y a-t-il quelques caractères analytiques qui résument assez bien à eux seuls, l'état d'un sol ?

3) Peut-on, éventuellement à l'aide de ces critères, mettre en évidence des modifications de l'état d'un sol, entre deux instants t_0 et t ? Enfin ces modifications sont-elles différentes en intensité ou portent-elles sur des caractères du sol différents, selon les systèmes de culture ?

Nous rapportons ici la contribution que peut fournir l'analyse statistique des données issues du dispositif expérimental avec rotations d'Auzeville. Nous exposons les résultats en deux parties :

a) élaboration d'un modèle de variabilité des analyses de terre (choix d'individus, de variables, de covariables, définitions de facteurs) ;

b) fonctionnement de ce modèle, en essayant de montrer comment chaque résultat permet de répondre aux questions posées, mais en laissant peu de place à l'interprétation agronomique ; une synthèse sur ce plan devra être faite considérant aussi d'autres aspects de l'expérimentation.

I. — Méthodes expérimentales

A) *Le dispositif expérimental*

1) *Le plan.*

Pour une présentation détaillée du dispositif avec rotations d'Auzeville, on se reportera à Marty et Hutter (1975). Nous rappellerons seulement qu'y sont conduites depuis 1968 des rotations culturales à cycle court (1 à 5 ans) représentant bien les possibilités régionales (tabl. 1). Pour chaque rotation, une seule culture du cycle est présente chaque année.

TABLEAU I

Liste des rotations étudiées (essai « Rotation » proprement dit)

Crop rotations included in the experiment

Numéro affecté à la rotation dans la suite du travail	Rotations
1	Monoculture Maïs
2	Monoculture Sorgho
3	Maïs-Blé
4	Sorgho-Blé
5	Maïs-Blé-Orge + Culture dérobée (CD)
6	Ray-grass-Sorgho-Blé
7	Ray-grass-Blé-Colza + CD-Orge de printemps
8	Luzerne 3 ans-Sorgho fourrager-Blé + CD
9	Rot. souple avec oléoprotéagineux
11	Fourrage continu (Luzerne ou Fétuque)

Y est aussi conduite une succession longue de douze cultures présentes chaque année sur le dispositif (partie du dispositif appelée « Etalon Agronomique ») (tabl. 2).

On voit que l'on peut individualiser dans cette partie du dispositif, plusieurs séquences (successions) différentes dont on peut déjà remarquer que, comme dans les rotations 1 à 11, certaines sont à tendances céréalières et d'autres à tendances fourragères.

Dans la suite, nous appellerons « rotations », aussi bien les rotations « vraies » que les successions individualisées dans la partie Etalon Agronomique.

2) *Le sol.*

Pour une vue générale sur les sols et le climat de la région toulousaine on peut se reporter à Brunet (1965). Selon Marty et Hutter (1975) :

« L'essai couvre 12 ha d'un terrain de topographie relativement plane.

TABLEAU 2

Liste des successions individualisées dans la partie « Etalon agronomique » du dispositif

Crop successions extracted from the « Etalon agronomique » part of the design

Culture en 69	70	71	72	73	74	75	Numéro affecté à la rotation dans la suite de l'étude
Luzerne	Luz	Luz	Luz	Blé	Maïs	BD	12
Luzerne	Luz	Luz	Blé	Maïs	BD	OA	12
Luzerne	Luz	Blé	Maïs	BD	OA	RG	15
Luzerne	Blé	Maïs	BD	OA	RG	S	17
Blé	Maïs	BD	OA	RG	S	T	17
Maïs	BD	OA	RG	S	T	OP	17
Blé Dur (BD)	OA	RG	S	T	OP	Luz	13
Orge d'automne (OA)	RG	S	T	OP	Luz	Luz	13
Ray-grass (RG)	S	T	OP	Luz	Luz	Luz	14
Sorgho (S)	T	OP	Luz	Luz	Luz	Luz	14
Tournesol (T)	OP	Luz	Luz	Luz	Luz	Blé	16
Orge de printemps (OP)	Luz	Luz	Luz	Luz	Blé	Maïs	16
(Toute demi-parcelle ayant Fétuque en 75 quel que soit l'âge du fourrage : 123 ou 4)						Fétuque	15

Le sol quoique bien apparenté aux « terreforts » présente une hétérogénéité de texture superficielle liée à l'origine alluvionnaire récente plus ou moins remaniée (tabl. 3).

TABLEAU 3

Valeur moyenne et écart-type sur l'essai de quelques caractéristiques (1969)

Means and standard deviation of some variables in the experiment (1969)

	Moyenne	E. T.	Min.	Max.
p. 100 Argile	24,80	4,48	14,9	35,0
p. 100 Matière Organique ..	1,67	0,24	1,20	2,20
p. 100 Cailloux	2,31	2,76	0	15,00
Profondeur du sol (en cm) ..	—	—	50	200

Une cartographie détaillée, basée sur l'analyse granulométrique de surface a permis de dégager des zones à tendance limono-argileuse (17 à 23 p. 100 d'argile) et des zones à tendance argilo-limoneuse (28 à 34 p. 100 d'argile) ; entre ces deux extrêmes, ont pu être localisées deux zones intermédiaires plus ou moins profondes et caillouteuses. »

Sur chacune de ces quatre zones sont installées une répétition (en irrigué et non irrigué) de chaque culture de l'étalon agronomique et une répétition (en irrigué et non irrigué) de chaque « rotation vraie ». Dans chacune des zones, les différentes cultures sont réparties au hasard.

B) *Les données*

Nous disposons pour chaque parcelle du dispositif de deux mesures, l'une effectuée en mars 1969, l'autre à l'automne 1975 des variables suivantes (entre parenthèses la notation utilisée dans la suite) :

— granulométrie :
p. 100 Argile (p. 100 A) : fraction comprise entre 0 et 2 μ
p. 100 Limon (p. 100 L) : fraction comprise entre 2 et 20 μ
p. 100 « S_1 » (S_1) : fraction comprise entre 20 et 50 μ
p. 100 « S_2 » (S_2) : fraction comprise entre 50 et 200 μ
p. 100 « S_3 » (S_3) : fraction comprise entre 200 et 2 000 μ
p. 100 matière organique (MO)
— carbone total (C), azote total (N), rapport C/N (C/N)
— pH
— Mg, K, P_2O_5 (P)
— taux d'agrégats ALCOOL (ALC), BENZENE (BZN), AIR. Agrégats vrais
— sables grossiers de l'analyse de stabilité structurale (SG)
— argile + limon maximum de l'analyse de stabilité structurale (A + L MAX)
— test S (TS)
— test K (TK)

Remarques.

1) MO a été calculé soit à partir du carbone soit à partir de l'azote selon l'année et le lieu d'analyse. *Nous l'avons donc éliminé de l'étude.*

2) p. 100 A + p. 100 L + S_1 + S_2 + S_3 + MO = 100 p. 100.
Analyse soit selon la méthode internationale, soit selon la méthode de la pipette Robinson — 3 prélèvements par parcelle, mélangés et reéchantillonnés (surface des parcelles : 180 m^2 en non irrigué et 240 m^2 en irrigué).

3) Unités : Mg et K en meq p. 100 g
P en p. 1 000
C et N en p. 1 000.

4) Agrégats : méthode Hénin sur un seul prélèvement par parcelle (Hénin *et al.*, 1969).

5) Nous disposons en fait d'autres variables (calcium, capacité d'échange, sodium, oligo-éléments) mais de façon incomplète. Nous ne les avons pas introduites dans l'étude afin de ne pas éliminer un trop grand nombre de parcelles parce qu'une de ces variables manquait.

C) *La méthode statistique* (fig. 1)

Notre travail est centré sur la confection d'un modèle d'analyse de variance expliquant les analyses de terre en 1975 par l'action des éléments du plan expérimental (Dagnélie, 1975).

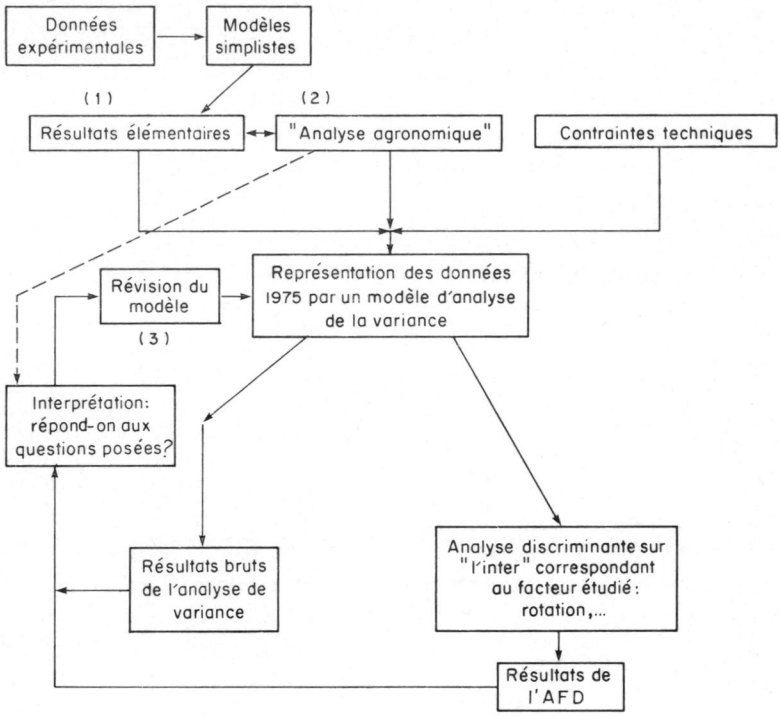


FIG. 1. — *Représentation schématique de la démarche effectuée.*
Schematic picture of methodology.

Statistiques élémentaires :
ACP sur données 1969
ACP sur données 1975
Anal. de var. à 1 fact. variantes de sol en 1969
AFD sur ce facteur

Il nous faut pour cela :

1) une analyse agronomique permettant de formuler des hypothèses sur l'action des facteurs et sur leurs interactions et permettant de choisir les modalités de ces facteurs ;

2) des résultats élémentaires sur les données disponibles permettant en particulier de préciser la forme de certains facteurs (covariables) et de choisir l'ensemble des variables à expliquer ;

3) tenir compte des contraintes existantes soit au niveau des programmes soit au niveau de la confection d'un modèle linéaire.

Bien que l'analyse variable par variable ne soit pas exclue, notre démarche est essentiellement multivariable. En effet, on peut penser *a priori* :

— que les caractéristiques d'un échantillon de terre forment un ensemble d'éléments interdépendants et cette interdépendance est une information qu'il est nécessaire de prendre en compte ;

— que l'analyse de cette interdépendance doit permettre de définir les éléments principaux de la variabilité spatiale.

Le fonctionnement du modèle d'analyse de variance (estimation des effets, tests d'hypothèses variable par variable, constituant les résultats bruts) est donc naturellement complété par une analyse factorielle discriminante (AFD dans la suite). Cette analyse recherche des combinaisons linéaires des variables de départ qui séparent mieux que n'importe quelle variable de départ les modalités du facteur étudié (Cailliez et Pagès, 1976). On a donc fait l'hypothèse que l'action des facteurs sera mieux perçue en une analyse multivariable qu'en plusieurs analyses univariables.

De même certains résultats élémentaires seront issus d'analyses en composantes principales (ACP dans la suite) qui, contrairement à l'AFD, ne tiennent pas compte du plan expérimental. On recherche, par l'analyse des corrélations entre variables de départ, un petit nombre de nouvelles variables, combinaisons linéaires des précédentes, qui, permettant de visualiser les données de base dans un espace à 2 ou 3 dimensions, puissent en donner un aspect synthétique interprétable (Cailliez et Pagès, 1976).

Le modèle d'analyse de la variance peut être révisé (nouveaux choix des variables explicatives, des facteurs, des unités statistiques, introduction de covariables) jusqu'à ce qu'on réponde aux questions posées.

Dans l'exposé des résultats, nous parlerons de « matrice INTER » et de « matrice INTRA ». Ce sont des matrices de corrélations ou de variances — covariances entre les variables, respectivement calculées sur les moyennes par niveau du facteur considéré et sur les écarts individuels à ces moyennes (Dagnélie, 1975).

II. — Résultats

A. — *Modélisation de la variabilité des caractères du sol. Analyse de la variance*

A.1. — *Choix des parcelles et des caractères du sol étudiés : qualité des échantillonnages.*

L'ensemble des déterminations effectuées est décrit plus haut. Il était nécessaire, avant d'entreprendre l'ensemble des calculs, de s'assurer que les données n'étaient pas complètement faussées par un mauvais échantillonnage sur le terrain ou par des erreurs au niveau de l'analyse de l'échantillon.

Nous sommes partis du principe que la granulométrie d'une parcelle est un caractère stable au cours du temps et du critère suivant : deux échantillonnages au cours du temps sur une même parcelle sont corrects si la granulométrie n'est pas trop modifiée entre les 2 échantillonnages ; et alors, non seulement la granulométrie, mais aussi les autres déterminations réalisées sur les 2 échantillons sont correctes (pour nous : C, N, C/N, pH, Mg, P, K).

Le tableau 4 indique le nombre de parcelles « mal échantillonnées » d'après le critère (Granulo 75/Granulo 69) pour deux seuils de tolérance. Ce nombre passe de 56 à 17 et de 21 à 3 en adoptant la détermination (argile + limon) au lieu de (argile). Bien que ces réductions soient qualitativement normales (à la limite, la granulométrie ne s'écarte pas de 100 p. 100 si on considère l'ensemble des fractions), elles semblent quantitativement très importantes et peuvent s'expliquer d'une part par la bonne qualité d'ensemble de l'échantillonnage : plus de 90 p. 100 des parcelles ont une granulométrie appréciée par (p. 100 A + p. 100 L) qui ne bouge pas (au seuil ± 10 p. 100)

entre 1969 et 1975, et d'autre part, par le fait qu'avec une des méthodes d'analyse employées, la détermination du p. 100 A est assez aléatoire contrairement à (p. 100 A + p. 100 L).

TABLEAU 4

Nombre de parcelles « mal échantillonnées » (en 1969 ou en 1975) selon notre critère, en fonction de deux seuils de tolérance du rapport granulo. 75/granulo. 69 (sur cent soixante seize parcelles)

Number of « bad sampled » plots according to our criterion : granulo. 75 ∉ [granulo. 69 ± 10 p. 100 (20 p. 100)]

Seuil	granulométrie appréciée par	
	p. 100 argile	p. 100 argile + p. 100 limon
± 10 p. 100	56	17
± 20 p. 100	21	3

En ce qui concerne l'échantillonnage pour les déterminations de stabilité structurale, on note une corrélation de 0,933 en 1975 et 0,898 en 1969 entre S_3 (échantillonnage granulométrie) et sables grossiers (échantillonnage stabilité) qui sont toutes deux des fractions de sables de diamètre compris entre 200 μ et 2 000 μ. Nous avons conclu que les valeurs de stabilité structurale obtenues sont bien elles aussi représentatives de l'état de l'ensemble de la parcelle, puisque nous avons considéré S_3 bien représentatif (nous ne pouvions pas utiliser le même critère que pour la granulométrie, puisque la stabilité structurale est une donnée *a priori* évolutive).

Nous avons retenu pour l'analyse de variance multivariable les dix-neuf variables déjà précisées (§ I.B : les données) et les cent soixante-dix-sept parcelles sur lesquelles sont observées ces dix-neuf variables et les deux covariables choisies (voir § II.A.2 : les termes du modèle).

Pour l'analyse de covariance (introduction de covariables, test de la matrice « INTER » ajustée du facteur sélectionné pour l'AFD) le choix des variables expliquées, limitées informatiquement (1) à 10, est guidé par les résultats de l'analyse de variance (on élimine les variables sur lesquelles le facteur sélectionné n'a pas d'effet significatif).

A.2. — *Les termes du modèle.*

Nous nous proposons de centrer notre étude sur l'analyse de la variabilité des caractères du sol en 1975 en fonction de trois facteurs principaux.

1) *Les rotations* (c'est-à-dire les successions observées entre 1969 et 1975 sur l'ensemble du dispositif) avec leurs itinéraires techniques différents (nature et date des interventions) portant sur des espèces différentes (période d'occupation du sol, enracinement, besoins nutritifs, etc... différents) doivent, c'est notre hypothèse de départ, se distinguer par des effets différents sur l'état du sol.

Nous avons distingué 16 rotations figurant dans les tableaux 1 et 2 (nombre de parcelles dans le tabl. 5). Dans la partie « Etalon agronomique » nous avons effectué

(1) A cause de la taille de notre ordinateur.

des regroupements en fonction de la place occupée par les cultures fourragères (nombre d'années et situation dans la succession).

TABLEAU 5

Types de précédents et nombres de parcelles par rotation ayant des données en 1975

Incidence matrix for « rotation » and « precedent » treatments (1975)

Type de précédent	Numéro de la rotation																Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	
1) céréales d'hiver + Colza, lin							4		8		16				9	8	45
2) Céréales d'été + Tournesol	7	7	7	6	8										8	15	58
3) Légumineuses à graines							3										3 irrigué
4) Fourrage						7		6		3		15	13	27			71
Total	7	7	7	6	8	7	7	6	8	3	16	15	13	27	17	23	177

2) *L'irrigation* modifiant les processus de dessication du sol et les possibilités d'absorption d'éléments nutritifs, peut aussi modifier l'évolution du sol. C'est notre deuxième hypothèse. Les deux modalités du facteur sont « irrigué » et « non irrigué » selon l'affectation du traitement aux parcelles en 1968, donc sans distinction sur les quantités d'eau apportées.

Nous disposons en 1975 de quatre-vingt-treize parcelles « non irriguées » et de quatre-vingt-quatre parcelles « irriguées ».

3) *La culture précédent le prélèvement* de terre en 1975 peut aussi avoir une influence spécifique indépendante de l'effet cumulatif de la rotation, ne serait-ce que par la date de récolte de ce précédent (donc la durée de « sol nu » entre récolte et prélèvement), ou par l'absence de travail du sol avant prélèvement (cas du fourrage continu).

Nous avons distingué quatre types de précédents présents sur le dispositif en 1975 (tabl. 5).

Ces trois facteurs principaux peuvent interagir, et nous avons trois types d'interactions possibles :

Rotation-Irrigation : Il y a interaction si l'irrigation n'a pas le même effet dans toutes les rotations : ce sera notre 4e hypothèse, car si l'on peut attendre des différences entre « irrigué » et « non irrigué » sur les rotations comportant beaucoup de cultures d'été (donc fortement irriguées), ces différences doivent être beaucoup moins fortes sur rotations comportant beaucoup de cultures d'hiver (donc peu ou pas irriguées).

Rotation-précédent : L'observation de la matrice d'incidence (tabl. 5) montre qu'il est inutile de chercher à estimer les paramètres de cette interaction, car nous n'avons aucune valeur observée pour beaucoup de couples rotation-précédent. Nous ferons donc l'hypothèse que cette interaction est nulle, et nous ne la testerons pas.

Irrigation-précédent. L'hypothèse est la même que pour l'interaction rotation-irrigation, puisque certains précédents sont peu irrigués (céréales d'hiver).

Enfin, il était nécessaire, pour étudier les analyses de terre en 1975, de faire la part entre les différences entraînées par l'effet des traitements et les différences dans l'état intrinsèque des parcelles, c'est-à-dire les différences qui existaient déjà en 1969.

C'est pourquoi nous avons introduit dans le modèle d'analyse deux covariables :

— (p. 100 argile + p. 100 limon) en 1969,

— Le test S en 1969,

dont le choix sera justifié plus loin ; ainsi dans la variabilité 75 nous ne prenons en compte que la partie due à l'évolution des sols entre 69 et 75.

Notre modèle général d'analyse de variance, préliminaire de l'analyse discriminante, s'écrit donc :

$$\underset{\text{variables étudiées}}{[\text{sol } 75]} = \underset{\substack{\text{terme de}\\ \text{moyenne}\\ \text{générale}}}{\mu} + \underbrace{\underset{\text{Rotations}}{\alpha^{i}} + \underset{\text{Irrigation}}{\alpha^{j}} + \underset{\text{Précédents}}{\alpha^{k}}}_{\text{effets simples}} + \underbrace{\beta_{RI}^{ij} + \beta_{IP}^{jk}}_{\text{effets d'intercation}} + \underset{\text{covariables}}{[\text{sol } 69]} + \underset{\text{terme d'erreur}}{Z_{ijk,l}}$$

Le modèle est croisé ; en fait l'observation de la matrice d'incidence nous fait penser à un modèle hiérarchique (rotation hiérarchisée dans précédents) mais l'existence des rotations 7, 16 et 17 nous impose un modèle croisé fortement déséquilibré.

A.3. — *Tests d'hypothèses d'absence d'interaction en présence des covariables, c'est-à-dire en utilisant le modèle ci-dessus.*

1) *Irrigation-précédents* : χ^2 de Bartlett = 19,19 (1). Probabilité associée = 0,38 ;

Nous décidons de ne pas rejeter l'hypothèse d'absence d'interaction et pour récupérer dans le terme d'erreur $Z_{ijk,l}$ le nombre de d.d.l. correspondant, nous retirons le terme β_{IP}^{jk} du modèle d'analyse de variance. On peut traduire ce résultat en disant que l'irrigation ne modifie pas les différences d'effets entre précédents culturaux, ou que l'effet de l'irrigation est le même quel que soit le précédent sur lequel elle est appliquée.

2) *Rotation-irrigation* : χ^2 de Bartlett : 199,04. Probabilité associée = $0{,}36.10^{-4}$.

Nous rejetons l'hypothèse d'absence d'interaction ce qui signifie que selon que l'on irrigue ou pas, les différences entre rotations ne seront pas les mêmes.

L'existence de cette interaction ne nous permet pas d'étudier l'effet d'irrigation en tant que tel : nous continuerons donc notre étude en séparant parcelles irriguées et parcelles non irriguées. Notre modèle général sera donc le suivant :

$$[\text{sol } 75] = \mu + \underset{\substack{\text{effet de la}\\ \text{rotation i}}}{\alpha_R^{i}} + \underset{\substack{\text{effet du}\\ \text{Précédent k}}}{\alpha_P^{k}} + [\text{sol } 69] + Z_{ik,l}\,.$$

Nous l'appliquerons séparément sur les parcelles irriguées et sur les parcelles non irriguées.

---

(1) Approximation du critère de Wilks : équivalent multivariable du F de Fischer.

A.4. — *Définition du terme* [sol 69] : *une caractérisation simple de la couche arable du dispositif.*

Les variations spatiales d'état du sol en 1969 peuvent être prises en compte de façon discrète par définition d'un facteur bloc dans le modèle, ou de façon continue par utilisation de covariables.

Il paraissait naturel d'utiliser la partition du dispositif définie en 1968, en 4 variantes du sol recevant chacune toutes les rotations en irrigué et en non irrigué. Mais cette partition tenant à la fois à l'appréciation de la granulométrie, de la présence de cailloux et de la profondeur du sol, il fallait vérifier que nous pouvions utiliser cette partition pour bien décrire la position de départ d'un ensemble de variables ne comprenant plus ni la quantité de cailloux et graviers, ni la profondeur mais comprenant en plus l'aspect chimique et l'aspect stabilité structurale.

Nous avons pour cela réalisé conjointement :

1) une analyse en composantes principales sur le tableau des cent soixante-neuf parcelles sur lesquelles ont été observées en 1969 les dix-neuf variables de notre étude, afin de repérer les axes principaux de variabilité spatiale ;

2) une analyse factorielle discriminante sur le même tableau, mais structuré en quatre sous-ensembles d'individus correspondants aux quatre variantes de sol.

A.4.1. *Résultats de l'ACP (sur matrice de corrélations).* Le tableau 6 indique le pourcentage d'inertie du nuage « expliqué » par chaque espace de représentation (axe 1, plan défini par les axes 1 et 2, etc...).

TABLEAU 6

Inerties « expliquées » par les cinq premiers axes factoriels (ACP 1969)

Eigenvalues and cumulated percentage of inerty for the first five principal components (1969)

N° de l'axe.....	1	2	3	4	5
Inertie	7,73	3,28	1,46	1,23	1,08
p. 100 Inertie cumulée	40,7	57,9	65,6	72,1	77,8

On peut repérer sur le cercle des corrélations (fig. 2) deux axes de variabilité dont la signification est assez nette : l'un est très lié aux caractères granulométriques, l'autre est très lié aux caractères de stabilité structurale et aussi à C, N, pH, Mg.

Le fait remarquable est que ces axes (qui ne sont plus de variance maximum) sont quasiment orthogonaux, ce qui dénote une quasi-indépendance dans la variabilité des deux séries de caractères.

A.4.2. *Résultats de l'analyse discriminante.*

L'analyse de variance à un facteur (variantes de sol) qui précède l'AFD montre que les variables p. 100 A, S_1, S_2, S_3, C/N, pH, P, Agrégats ALC, agrégats AIR, SG, TS prennent des valeurs significativement différentes sur au moins une variante de sol.

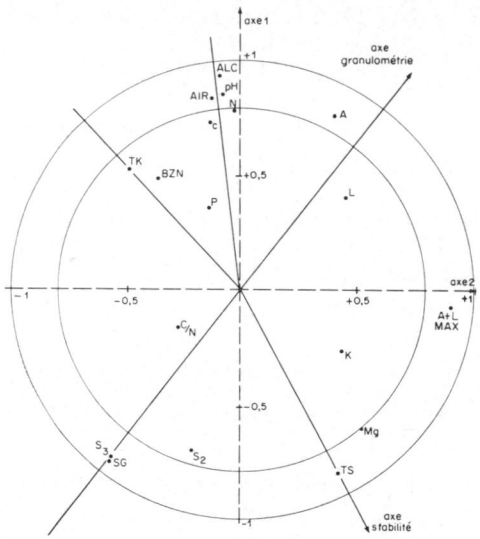


FIG. 2. — *Analyse en composantes principales* (données 1969) : *Cercle des corrélations*

Principal component analysis (1969) : *map of correlations between the first two principal components and initial variables.*

L'analyse discriminante sur « l'INTER » issue de l'analyse de variance et correspondant au facteur « variantes de sol », montre bien que les quatre variantes de sol sont discriminées par beaucoup plus que la granulométrie (voir tabl. 7).

TABLEAU 7

Corrélations (× 1 000) *entre les deux axes discriminants significatifs et les variables initiales utilisées pour l'AFD sur le facteur variantes de sol*

Correlations (× 1 000) *between the first two discriminant functions and the initial variables used in discriminant analysis on « soil variants » effect*

N° de l'axe		1	2
Variables	A	998	— 1
	L	62	502
	S_1	— 698	— 714
	S_2	— 967	— 241
	S_3	— 954	294
	C	486	— 291
	N	901	— 330
	C/N	— 935	192
	pH	951	— 288
	K	— 598	618
	P	673	589
	ALC	929	— 186
	BZN	— 353	— 866
	AIR	934	— 301
	SG	— 959	248
	$A + L_{max}$	805	571
	TS	— 843	258
	TK	887	318

Mais l'ACP sur la matrice de corrélation INTRA (fig. 3) (corrélations des écarts aux centres de gravité des quatre sous-nuages) montre que la structure de cette matrice est identique à la structure de la matrice de corrélation « totale » analysée précédemment.

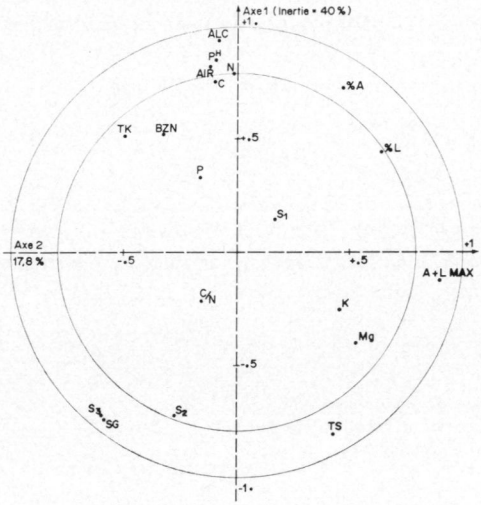


FIG. 3. — *Analyse en composantes principales sur la matrice INTRA de l'AFD sur le facteur « variantes de sol » 1969 : Cercle des corrélations.*

Principal component analysis on within-group matrix got from analysis of variance on « soil variants » effect (1969) : map of correlations between the first two components and initial variables.

Cela signifie qu'il reste à l'intérieur du nuage moyen des quatre variantes de sol, une importante variabilité de même nature que celle du nuage total.

Pour revenir au problème initial (définir la situation sol en 1969), il apparaît que considérer la partition en quatre variantes de sol fait perdre toute l'information représentée par la variabilité « intra-variantes ».

En conclusion, la situation de départ du dispositif ne peut pas, pour notre étude, se discrétiser sans perte d'information. Nous avons donc choisi d'introduire des covariables dans notre modèle d'analyse de la variance. Il convenait alors de les choisir.

Le but étant de décrire au mieux l'état d'une parcelle c'est-à-dire, de prendre en compte le mieux possible la variabilité inter-parcelle, nous avons utilisé l'ACP 1969 pour choisir la variable p. 100 A + p. 100 L représentant la variabilité granulométrique, et le test S représentant la variabilité stabilité structurale et celles des variables corrélées (C et N en particulier). Seule une variable très corrélée avec le 3e axe principal de l'ACP aurait pu alors apporter une information complémentaire, mais une faible quantité d'information, vu le faible pourcentage d'inertie expliquée par le troisième facteur (tabl. 6).

B. — *Fonctionnement du modèle.*
Effet des rotations sur l'évolution des caractères du sol

B.1. — *Analyse de covariance.*

Le modèle suivant a donc été appliqué sur les parcelles irriguées d'une part et les parcelles non irriguées d'autre part :

$$\text{sol } 75 = \mu + \underset{\substack{\text{effet}\\\text{rotation i}}}{\alpha_R^i} + \underset{\substack{\text{effet}\\\text{précédent k}}}{\alpha_P^k} + \underbrace{(\text{p. 100 A} + \text{p. 100 L})_{69} + (TS)_{69}}_{\text{covariables}} + Z_{ik,l}$$

Compte tenu du but poursuivi, à savoir : « après 7 années de culture les différentes rotations ont-elles eu une action différenciée sur les variables de sol étudiées ? » et de l'optique descriptive de notre travail, nous ne nous attacherons pas ici aux résultats élémentaires fournis par l'analyse de covariance. Nous présentons dans le tableau 8 les résultats indispensables à la poursuite de l'étude.

TABLEAU 8

Résultats de l'analyse de covariance : Les variables suivantes ont été sélectionnées après le passage d'ANVARM : C, N, C/N, Mg, K, ALC, BZN, AIR, TS, TK

Results of covariance analysis (following variables were kept after ANOVA)

	Irrigué	Non irrigué
Nombre de parcelles	83	93
Test de l'effet rotation (probabilité de dépasser la valeur du test)	$1{,}23 \times 10^{-2}$	$1{,}7 \times 10^{-4}$
Test sur les covariables (probabilité de dépasser la valeur du test)	10^{-11}	10^{-19}

Il apparaît à l'évidence (probabilités très faibles) que, pour les deux modalités d'irrigation des parcelles, nous pouvons, dans le cadre des hypothèses que nous avons définies, répondre par l'affirmative à la question posée.

Ce point acquis, nous pouvons nous interroger sur les points suivants :

— quelles variables sont plus spécialement à l'origine de différences entre rotations ?

— peut-on faire des groupes de rotations ?

C'est-à-dire, toutes les rotations ont-elles des comportements différents, ou bien peut-on faire quelques groupes de rotations se comportant de la même manière ?

B.2. — *Analyse discriminante.*

Dans cette optique, nous poursuivons l'étude par une analyse factorielle discriminante sur la matrice de variance-covariance « INTER » issue de l'analyse de variance et correspondant au facteur rotation. Les tests sur les covariables étant significatifs, nous travaillerons sur la matrice ajustée des covariables. Les principaux résultats de cette analyse sont regroupés dans le tableau 9.

Avant de passer à la représentation des « points moyens rotations » dans l'espace des variables canoniques discriminantes il nous faut remarquer que :

— en irrigué comme en non irrigué, l'espace discriminant est de dimension 2, c'est-à-dire un plan. C'est donc dans celui-ci que nous « représenterons » les rotations ;

— en irrigué comme en non irrigué, la première variable canonique, donc *a fortiori* le premier plan, a un bien meilleur pouvoir discriminant que la meilleure variable initiale.

TABLEAU 9

Résultats de l'analyse factorielle discriminante (facteur Rotations)

Results of factorial discriminant analysis

	Irrigué			Non irrigué			
Dimension de l'espace de représentation des points moyens	2			2			
Valeurs propres significatives	8,7	5,3		12,6	5,4		
F maxima de l'analyse univariable .	4,6	3,4	2,9	5,8	4,0	4,0	3,5
Variable correspondante	AIR	N	C/N	TK	C/N	AIR	BZN

La discrimination entre les rotations, à travers ces deux remarques sur les résultats, apparaît comme un phénomène plus multivariable qu'univariable. Ceci n'a rien d'étonnant puisque notre groupe de variables n'est pas composé de variables « indépendantes » mais que l'on peut le scinder en sous-groupes tels que Chimie du Sol (Mg, K_2O), Stabilité Structurale (Agrégats, TS, TK), Matière Organique (N, C, C/N). C'est donc l'ensemble du phénomène plus qu'une de ses composantes qui va discriminer nos rotations. La différence entre les valeurs des premières valeurs

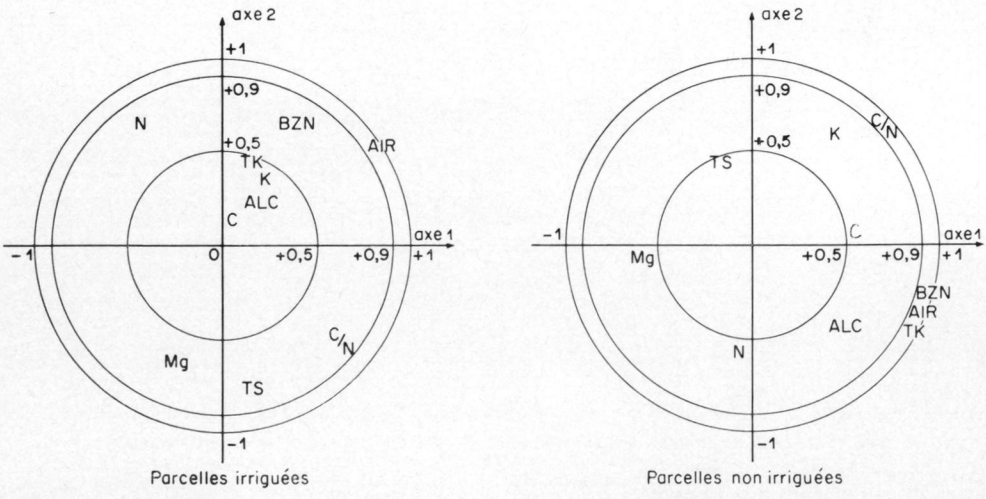


FIG. 4. — *Analyse discriminante du facteur rotation : corrélations entre variables initiales et axes canoniques au sens INTER.*

Factorial discriminant analysis on « rotation » effect : correlations between initial and canonical variables.

propres en « sec » et en irrigué peut d'autre part nous faire craindre une interprétation plus difficile dans le cas irrigué.

B.2.1. *Identification du plan discriminant.*

Pour identifier le plan, nous pouvons regarder les coefficients de corrélations au sens INTER entre les variables initiales et les variables canoniques représentés sur la figure 4 à l'intérieur d'un cercle de rayon 1.

Ces graphes nous confirment le caractère moins identifiable du plan discriminant dans le cas irrigué, une seule variable seulement ayant une corrélation supérieure à 0,9 avec le plan discriminant (Agrégat Air). En sec, par contre, trois variables de « stabilité » (Test K, Agrégat Air, Agrégat Benzène) et une variable « Matière Organique » (C/N) se retrouvent fortement corrélées avec le plan discriminant.

Avec des qualités de représentation différentes on peut en première approximation donner une signification voisine au plan discriminant dans les deux cas à savoir : « plan stabilité structurale et matière organique ». Nous donnons cette signification à cause de la présence de variables de ces deux groupes dans des directions orthogonales, à de hauts niveaux de corrélations avec le plan, et malgré la présence de « variables chimiques » à des niveaux de corrélations voisins de certaines « variables stabilité » ou « matière organique ». En effet, en aucun cas la chimie du sol ne détermine vraiment le plan discriminant (coefficient de corrélation maximum avec le plan : 0,7 pour K_2O en non irrigué) alors que c'est toujours le cas pour une au moins des variables du groupe matière organique ou stabilité.

B.2.2. *Projection des rotations dans le premier plan discriminant.*

Le plan discriminant ainsi défini dans les cas irrigué et non irrigué, nous pouvons examiner maintenant les projections des « points moyens-rotations » dans ces plans (cf. fig. 5*a* et 5*b*).

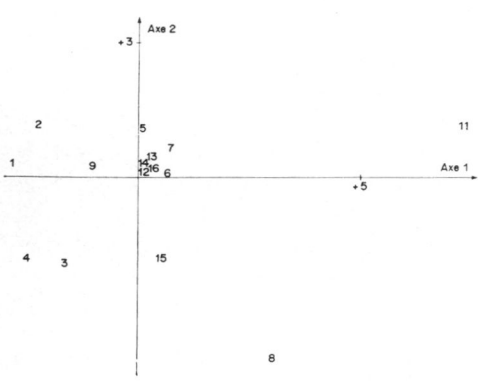


FIG. 5*a*.

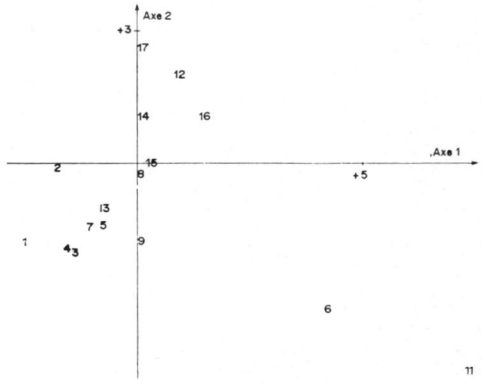


FIG. 5*b*.

FIG. 5. — *Représentations des points moyens — rotations dans le* 1er *plan discriminant.*

5*a*. — Rotations irriguées.

5*b*. — Rotations non irriguées.

Projections of rotations (mean-points) on the first discriminant plan.

5*a*. — Irrigated plots.

5*b*. — Non irrigated plots.

Les cercles des corrélations (fig. 4) montrent que :

— en irrigué : AIR est corrélée positivement avec les facteurs 1 et 2, C/N est corrélée positivement avec le facteur 1 et négativement avec le facteur 2. AIR est ainsi associée au quadrant 1 et C/N au quadrant 2, par opposition à N, associée au quadrant 4.

— en non irrigué : les 3 variables de stabilité structurale bien corrélées avec le plan sont associées au quadrant 2 ; C/N est associée au quadrant 1 et N, beaucoup moins nettement, au quadrant 3.

La position des points-moyens dans les quatre quadrants du plan va donc nous permettre, non seulement de séparer des groupes de rotations, mais aussi de donner à la discrimination un sens par rapport aux variables de départ.

Ainsi, en irrigué, nous pouvons distinguer trois groupes :

— les rotations à C/N plus faible, N plus fort, AIR plus faible : 3, 4 et surtout 1, 2, 9 ;

— les rotations à C/N plus fort, N plus faible, AIR plus fort : 6, 7, 15 et surtout 8 et 11 ;

— les rotations 5, 12, 13, 14, 16, 17 regroupées près de l'origine et qui ont donc un comportement moyen vis-à-vis de C/N, N et AIR.

En non irrigué, les rotations 6 et 11 sont associées à de plus fortes valeurs de la stabilité structurale. Les rotations 1, 2, 3, 4, 5, 9 s'opposent aux rotations 12, 16, 17, les premières ayant de plus faibles valeurs de C/N.

Les variables AIR, TK, BZN étant très corrélées avec l'axe 1, on doit ainsi noter une opposition sur ces variables-là entre les rotations 11 et 6 d'une part et les rotations 1, 2, 3, 4 d'autre part.

III. — Discussion

A. — *Fiabilité de nos données*

Les analyses statistiques décrites ci-dessus ont porté sur la totalité des résultats expérimentaux disponibles.

En effet, sauf pour quelques parcelles que nous n'avons pas cru devoir éliminer pour autant, nous avons jugé que l'échantillonnage est bon. Ceci, malgré les approximations suivantes :

— si deux déterminations sur la même parcelle sont égales il est peu probable qu'elles soient mauvaises toutes les deux ;

— le jugement global ne se fonde que sur la granulométrie. Ceci ne se justifie vraiment que si la granulométrie et les autres critères ont la même variabilité spatiale ;

— si un échantillon est représentatif, les déterminations réalisées sont correctes. Cela revient à supposer qu'il n'y a pas d'erreurs d'analyse ;

— la granulométrie peut varier légèrement dans le temps sous l'effet de techniques culturales particulières, et nous n'avons pas tenu compte de cela.

B. — *Caractérisation simple du sol*

Nous sommes arrivés à une caractérisation du sol par deux éléments (covariables de notre modèle) : la granulométrie et un test de stabilité structurale. On peut faire trois remarques sur cette caractérisation.

1) Elle n'est la simplification que de notre ensemble de variables de départ : si nous avions eu un ensemble de variables plus complet (profondeur, caractères hydriques...) nous ne serions peut-être pas arrivé à la même caractérisation.

De plus, les deux premiers axes de l'ACP 1969 (fig. 2) n'absorbent que 58 p. 100 de la variance totale du nuage des parcelles, ce qui signifie, en simplifiant, que si la granulométrie et la stabilité structurale définissent à elles seules le premier plan principal et rien que lui, 42 p. 100 de la variance sont dues à des variables telles que C, N, C/N, pH, K, P, Mg. Ceci montre bien la difficulté qu'il y a, même à l'intérieur du cadre réduit du dispositif d'Auzeville, à décrire l'état d'un sol par un petit nombre de caractères synthétiques bien typés.

2) Le choix du test de stabilité est assez arbitraire : nous aurions pu choisir comme covariable une variable corrélée avec la stabilité : le carbone, le pH, etc... (fig. 2). Il est aussi discutable : les valeurs de S dépendent des conditions de milieu lors du prélèvement de terre (Sebillotte, 1968). Mais cela n'a pas gêné notre étude puisque nous n'avons pas comparé des valeurs de S mesurées à des dates très différentes.

Notre choix n'a de valeur que statistique : il peut nous aider à classifier les parcelles à l'aide de deux caractères seulement et ne saurait décrire l'ensemble des caractères agronomiques des sols du dispositif, ni, bien évidemment, des sols en général.

3) Enfin, une ACP sur les observations faites en 1975 révèle que les axes de variabilité spatiale sont restés les mêmes et qu'en particulier, il n'en est pas apparu de nouveaux : les éléments minéraux P et K restent peu variables relativement aux autres caractères. C/N, comme en 1969 et contrairement aux termes du rapport, n'est toujours pas un élément essentiel de la variabilité interparcelles.

C. — *Effet des rotations*

1) Nous avons mis en évidence, sur le dispositif d'Auzeville, des différences entre rotations sur l'évolution de quelques propriétés du sol à savoir : des variables « matière organique » (C/N et dans une moindre mesure N) et des variables « stabilité structurale » (taux d'agrégats stables après pré-traitements benzène et air, test K).

On remarque immédiatement les comportements très différents des rotations à tendance céréalière et des rotations à tendance fourragère. Les premières se caractérisent par de plus fortes valeurs de N, et de moins fortes valeurs de C/N et des variables de stabilité structurale. Rappelons sur l'exemple de C/N qui a dans l'ensemble diminué, que l'on doit traduire cela par : les valeurs de C/N ont plus diminué entre 1969 et 1975 dans les rotations céréalières que dans les rotations fourragères.

On remarque aussi le faible pouvoir discriminant du carbone. Le pouvoir discriminant de C/N, qui traduit des évolutions différentes des formes de matière organique dans les deux groupes de rotations, serait donc dû beaucoup plus aux différences observées sur N.

La plus forte augmentation de N en rotations céréalières n'existe d'ailleurs qu'en irrigué. On peut expliquer cela par des apports souvent bien supérieurs aux exportations, ce qui est particulièrement vérifié en culture irriguée.

Quant à la stabilité structurale, il n'est pas étonnant de retrouver l'opposition entre les deux monocultures de maïs et de sorgho, et les rotations fourragères. Mais le carbone se révélant peu discriminant, cette opposition sur la stabilité n'apparaît pas directement liée à une opposition sur la matière organique, et semble devoir être expliquée par d'autres caractères agronomiques des rotations fourragères et céréalières.

La position moyenne des rotations individualisées dans l'étalon s'explique bien : la succession des cultures y a été déterminée de façon qu'elles puissent être implantées sans hâte sur un précédent supposé favorable. Il ne peut donc y avoir d'effet cumulatif dans un sens ou dans l'autre. Cette remarque n'est pas vérifiée sur l'axe 2 du graphique non irrigué où les rotations 12, 16, 17 s'opposent à toutes les rotations « vraies » sans que l'on puisse donner une explication satisfaisante. La position moyenne des rotations de l'étalon peut aussi être due pour une bonne part au fait que ce sont les niveaux du facteur qui ont le plus d'observations (tabl. 5).

2) Nous venons de rencontrer un exemple des différences entre les deux graphiques « irrigué » et « non irrigué », qui illustrent le phénomène d'interaction rotations $\times$ irrigation testé précédemment.

On peut aussi remarquer que :

— la rotation 6 s'éloigne des rotations céréalières beaucoup plus en non irrigué qu'en irrigué alors que l'inverse se produit pour la rotation 8 ;

— la rotation 7, incluse dans le groupe « céréalier » en non irrigué, s'apparente en irrigué, au groupe « fourrager ». On peut penser que l'introduction d'une culture dérobée de soja en irrigué seulement est à l'origine de cette différence ;

— la rotation 15 (Etalon avec Fétuque en 1975) quitte en irrigué la position moyenne observée sur les autres successions de l'Etalon ;

— le groupe des rotations céréalières (1, 2, 3, 4, 5, 7, 9) est beaucoup plus dispersé en irrigué qu'en non irrigué.

3) un autre point à considérer est que les rotations se différencient très peu selon les modifications du niveau des éléments P et K. Il faut rattacher ce résultat au protocole adopté sur le dispositif, qui vise à maintenir pour chaque parcelle un niveau de fertilisation suffisant en apportant au sol en fin de culture l'équivalent des exportations en P et K, plus les pertes éventuelles estimées.

D. — *Modèle*

Les interprétations consécutives à cette étude sont volontairement exemptes d'affirmations trop tranchées.

En effet l'observation de la matrice d'incidence du plan expérimental (tabl. 5) nous montre le faible effectif dans chaque sous-population étudiée (rotations). Il est bien évident que la précision des estimations effectuées lors de l'analyse, souffre de cette pénurie.

De plus cette même matrice d'incidence nous apprend que le groupe de « rotations fourragères » est constitué par l'ensemble des rotations possédant le niveau 4

du facteur « précédent ». Il y a donc confusion au sens statistique du terme, entre l'effet du précédent cultural et celui de la rotation. L'effet du précédent incluant pour nous outre l'effet de la culture elle-même, les effets des techniques agronomiques liées à cette culture (date de récolte, temps écoulé entre récolte et prélèvement, etc...) il nous semblait possible *a priori* de mieux isoler l'effet rotation par l'introduction d'un facteur « précédent » dans le modèle. Les résultats obtenus lors de l'étude de ce facteur (probabilité du χ^2 de Bartlett associé à l'« INTER Précédent » ajustée des covariables : 0,99 en irrigué, 0,85 en non irrigué) nous permettaient *malgré l'impasse faite sur une possible interaction rotation* $\times$ *précédent*, de penser que nous pourrions par la suite étudier les rotations sans trop nous soucier de l'effet précédent.

Les résultats de l'AFD nous confirment l'existence présupposée de liaisons entre ces deux facteurs tels que nous les avons définis.

Au vu des définitions agronomiques des termes précédent cultural et rotation, on peut se poser la question de savoir si le modèle statistique le mieux adapté à la situation n'aurait pas été un modèle hiérarchique. Il est en effet plus facile *a priori* de concevoir que plusieurs rotations ont le même précédent que l'inverse. Malheureusement, l'écriture et l'application d'un tel modèle ne pouvaient répondre au problème posé puisque la comparaison de deux rotations n'ayant pas le même précédent devenait alors impossible. C'est donc à l'intérieur d'un modèle croisé qu'il va nous falloir lever cette confusion. Deux choses sont possibles :

— soit redéfinir « philosophiquement » la notion de précédent de façon à prendre en compte un facteur de variation qui puisse être indépendant de la rotation (bien qu'il apparaisse difficile dans le cadre du modèle linéaire de pouvoir séparer effet cumulatif et effet précédent) ;

— soit, avec notre modèle d'étude, refaire cette analyse à une date postérieure à 75 de telle façon que certaines rotations se trouvent changées de précédent mais que leurs effets propres ne soient pas trop modifiés.

Dans ce dernier cas l'identité ou non des résultats avec ceux fournis ici nous apporterait quelques éléments pour pouvoir séparer effet précédent et effet rotation.

Conclusion

Nous devons, pour conclure, replacer notre étude par rapport aux objectifs du dispositif avec rotations d'Auzeville. Celui-ci est destiné à apporter des réponses globales aux grands problèmes posés par les systèmes de cultures comme : l'intensification en présence d'irrigation, l'introduction de cultures nouvelles, conséquences d'une réduction du travail du sol, aspects technico-économiques, etc... L'analyse fine des mécanismes en est exclue.

Dans ce cadre, nous avons donné une large place à l'exposé de la méthodologie, car elle nous paraît être un bon exemple de ce qui peut être mis en œuvre sur un dispositif de ce genre (prise en compte des facteurs du plan expérimental, étude multivariable et descriptive). Par ailleurs, les résultats que nous avons exposés nous paraissent d'une précision suffisante. Bien que pas très originaux, ils méritaient d'être vérifiés dans un contexte bien différent de ceux dans lesquels ils avaient été établis. Ils montrent aussi que les analyses de terre peuvent être un outil intéressant pour

cerner quelques conséquences de rotations nouvelles ou de techniques nouvelles à condition de parer aux éventuels défauts d'échantillonnage ou d'analyse.

Tous les problèmes des conséquences sur le sol de la conduite d'un système de cultures et de l'effet de l'état du sol sur l'implantation et le développement des cultures ne sont pas pour autant résolus. Nous n'avons pas, en particulier, abordé ce qui se passe au-dessous de la couche arable. L'importance de cette zone est pourtant grande dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes. Nous n'avons pas non plus envisagé la structure du sol dans les trente premiers centimètres, et la stabilité de la structure n'informe pas sur la qualité de la structure.

Quel va être l'impact des conditions de sol sur la qualité du travail du sol ? Quels moyens peut-on mettre en œuvre pour corriger un mauvais état du sol et ainsi ne pas compromettre le développement de la culture ?

Ces problèmes, qui prolongent l'étude des analyses de terre, pourraient être abordés sur le dispositif d'Auzeville grâce aux données recueillies sur les passages d'outils, la facilité du travail et sa qualité jugée au moment du semis. Une synthèse des résultats des deux approches, qui devraient en partie s'expliquer mutuellement, devra alors être réalisée pour juger l'intérêt relatif des analyses de terre et des notations sur le travail du sol.

Reçu pour publication en octobre 1978.

Remerciements

Nous remercions MM. Hutter et Marty de la Station d'Agronomie de Toulouse (I.N.R.A.) et M. Lefort de la Chaire de Mathématiques de l'I.N.A.P.G. pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée.

Summary

Experimental methodology for studying the evolution of some characteristics of the surface soil on an experimental system with crop rotations

The consequences of the management of a cultural system on soil state may be partly studied through soil analysis. We study with a statistical methodology the data collected at a seven year interval on the Auzeville system with crop rotations.

Three problems are studied :

1) the reliability of our data concerning the sampling and the techniques of analysis ;
2) the characterization of the surface soil by some simple criteria ;
3) the effect of different crop rotations on the evolution of soil analysis values which is the main object of this study.

Our study is centred on a spatial variability model :

[soil 75] = [soil 69] + f (crop rotation, irrigation, cultural antecedant, interactions) + error.

The choice of the variables to explain [soil 75] is linked with the answer to question 1. No variable is set aside. The definition of the expression [soil 69] under the form of two covariables (p. 100 Clay + p. 100 silt) and (test S) is obtained by a principal component analysis and a discriminant factorial analysis and contributes to the answer to question 2.

Question 3 is dealt with by studying the effect « crop rotation » of the model (discriminant factorial analysis) : opposite a certain stability of the part « agronomical standard » of the system, the rotations set on cereals and the rotations set on fodder differ from one another in the evolution of organic matter and structural stability.

These results require a study of data of another nature (the notations on soil treatment in particular) for a better estimation of the impact of the cultural system on soil state.

Zumammenfassung

Versuchsmethodik fur die Untersuchung einiger eigenschaften der Bodenkrume auf eine experimentelle Anlage mit Fruchtfolge

Die Folgen auf den Bodenzustand der Führung eines Kultursystems können mit Bodenanalysen teilweise beurteilt sein. Wir untersuchen die mit einem Abstand von sieben Jahren auf die Anlage von Auzeville mit Fruchtfolge gesammelten Angaben mit einer statistischen Methodik.

Wir untersuchen drei Probleme :

1) die Zuverlässigkeit unserer Angaben was die Probenentnahme und die Analysentechniken betrifft.

2) die Charakterisieruhg der Ackerkrume mit einigen einfachen Kriterien.

3) die Auswirkung verschiedener Fruchtfolgen auf die Entwicklung des Wertes der Bodenanalysen, die das Hauptziel dieser Untersuchung ausmacht.

Unsere Untersuchung ist nach einem Modell raümlicher Veränderlichkeit :

[Boden 75] = [Boden 69] + E (Fruchtfolge, Bewässerung, Kulturvergangenheit, Wechselwirkungen) + Irrtum gerichtet.

Die Wahl der zu erklärenden veränderlichen Grössen hängt von der Antwort auf Punkt 1 ab. Keine veränderliche Grösse ist zurückgewiesen.

Die Erklärung des Ausdrucks [Boden 75] als zwei Kovariabel (p. 100 Ton + p. 100 Lehm) und (Test S) ist durch eine Analyse der Hauptkomponente und eine faktorielle Analyse der Diskriminante durchgeführt und fördert die Antwort auf Punkt 2.

Punkt 3 ist mit der Untersuchung der « Fruchtfolge » Auswirkung (faktorielle Analyse der Diskriminante) vorgenommen : in Bezug auf eine gewisse Beständigkeit des Teils « landwirtschaftlicher Standard » der Anlage unterscheiden sich die Fruchtfolge mit Getreide und die Fruchtfolge mit Futter durch die Entwicklung der organischen Substanz und der Strukturbeständigkeit.

Diese Ergebnisse bedürfen noch einer Untersuchung von verschiedenartigen Angaben (Bezeichnungen über Die Bodenarbeit insbesondere), um den Einschlag des Kultursytems auf den Bodenzustand besser zu schätzen.

РЕЗЮМЕ

Опыт методологии для изучения эволюции некоторых характерностей пахотного слоя в эксперименте с севооборотом.

Ж. Л. ШАРПЕНТО, Ж. П. РЕЛЛИЕ.

С помощью анализов почв, в данном труде оцениваются возможные последствия выбранной системы культуры, в смысле ее действия на состояние изучаемой почвы. С применением статистического метода изучаются данные, полученные с интервалом в семь лет на экспериментальном участке с севооборотом, в Озевилле. Рассматриваются, в частности, три проблемы : 1) надежность полученных данных об отборе образцов и о технологии применявшейся при анализах ; 2) Охарактеризование пахотного слоя с помощью нескольких очень простых критериев ; 3) Эффект различных севооборотов на эволюцию величин полученных при почвенных анализах — главный пункт данного изучения.

Изучение проводится на модели пространственной изменчивости [почва 75] = [почва 69] + f (севооборот, орошение, предшествующая культура, взаимодействие, возможная ошибка).

Выбор переменных величин нуждающихся в об'яснении [почва 75] зависит от ответа на первый вопрос. Ни одна из переменных не отбрасывается.

Чтобы получить ответ на второй вопрос определяется выражение [почва 69] в форме двух переменных (p. 100 глины + p. 100 суглинка) и с помощью анализа главных составных и дискриминантного факториального анализа реализируется тест S.

Ответ на третий пункт начинается с изучения эффекта севооборота на модель (дискриминантный факториальный анализ) : благодаря некоторой прочности части диспозитива, являющейся агрономическим эталоном, севообороты типа злаковых и типа кормовых дискриминируются по эволюции органического вещества и прочности почвенной структуры.

Полученные результаты необходимо дополнить с помощью изучения данных иного порядка (в частности — наблюдениями за обработкой почвы), чтобы оценить еще лучше влияние системы культуры на состояние почвы.

Références bibliographiques

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement de Maïs-Grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, **26** (5), 555-591.

BRUNET R., 1965. *Les campagnes toulousaines. Etude géographique.* Pub. de la Fac. des Lettres et Sciences Humaines de Toulouse. 727 p.

CAILLIEZ F., PAGÈS J. P., 1976. *Introduction à l'analyse des données.* SMASH. Chapitres 8 et 12.

DAGNÉLIE P., 1975. *Analyse statistique à plusieurs variables.* Presses Agronomiques de Gembloux. Chapitres 11 et 12.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural* (2e éd.), Masson, Paris.

MAERTENS C., STUDER R., 1963. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement des systèmes radiculaires de différentes cultures, répercussions sur le rendement. *C. R. Acad. Sc.*, **256,** 2016-2018.

MAERTENS C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Science du Sol* (2).

MARTY J. R., HUTTER W., 1975. *Expérimentations sur rotations de cultures irriguées ou non.* Document ronéotypé. Station d'Agronomie de Toulouse.

SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. agron.*, **19** (4), 403-414.

Ann. agron., 1978, **29** (4), 405-417.

Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore

II. — Répartition et extension géographique des faciès de végétation pastoraux

F. de MONTARD et L. GACHON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I.N.R.A.,
12, avenue de l'Agriculture,
63100 Clermont-Ferrand

Résumé

Sur la base de la typologie pastorale établie dans un article précédent, les divers faciès des pâturages d'été des Monts Dore sont cartographiés au 1/100 000e et étudiés en rapport avec l'altitude et la pente.

La concurrence de l'activité pastorale avec d'autres utilisations du sol, prés de fauche, forêts et tourisme, est analysée sous l'angle écologique : l'altitude, la pente et l'exposition y jouent un rôle prépondérant.

La production d'herbe est utilisée aux 2/3 environ. L'adoption généralisée du pâturage tournant et l'amélioration systématique ménagée, c'est-à-dire par le débroussaillage mécanique et la fertilisation des pâturages et des landes situés sur les pentes modérées, permettraient de doubler le cheptel estivé.

Notre étude des végétations pastorales des Monts Dore nous a conduit à délimiter l'extension des différentes formations végétales : forêt, landes et pâturages au fur et à mesure de la prospection. Certaines limites furent précisées à l'aide de photographies aériennes (mission IGN 1962) et une carte a été établie au 1/20 000e, incluant les plantations récentes de résineux. Cette carte a été ensuite simplifiée et ramenée au 1/100 000e de manière à faciliter la vue d'ensemble de l'occupation actuelle du massif (fig. 1, p. 412-413).

La carte reflète les interactions du régime d'exploitation, de l'exposition générale des versants, de l'altitude que nous avons mis en évidence précédemment, mais aussi de la pente qui joue un très grand rôle dans la mise en valeur, qu'elle soit agricole, forestière ou touristique.

La pente influence les déplacements des troupeaux et oriente les actions d'aménagement. Nous avons distingué trois classes principales :

— les pentes comprises entre 0 et 20 p. 100 sur lesquelles le débroussaillage mécanique et l'apport d'engrais par tracteur et épandeur porté centrifuge sont envisageables ;

— les pentes comprises entre 20 et 40 p. 100 sur lesquelles l'emploi du tracteur agricole n'est pas envisageable mais la circulation des troupeaux reste courante ;

— les pentes supérieures à 40 p. 100 sur lesquelles la circulation des troupeaux est faible et d'ailleurs peu désirable.

Nous avons délimité sur calque les zones correspondant à ces trois classes en mesurant l'écartement des courbes de niveaux sur la carte IGN au 1/100 000e et nous avons confronté ce découpage à la carte de la végétation et des altitudes. Cette confrontation a permis d'établir la répartition des types de végétation par classe de pente et d'analyser la structure générale du massif à travers les relations de la pente et de l'altitude (tabl. 1).

Munis de ce document complémentaire, nous pouvons conclure notre étude par une synthèse concernant la définition des estives, la place des végétations pastorales, l'état actuel de la concurrence entre l'aménagement pastoral et d'autres types

TABLEAU 1

Monts Dore. — Etat de l'Aménagement selon les pentes et l'altitude

Monts Dores. — Repartition of uses with slopes and altitude

Altitudes (Altitudes)	Pentes (Slopes)				Total (en ha)
	0 à 20 p. 100	20 à 40 p. 100	40 à 100 p. 100	Plus de 100 p. 100	
De 1100 à 1400 m					
	Pâturages et forêts ; activités touristiques diffuses (Pastures and forests ; slight tourism)				
Pâturages à *Festuca rubra* (ha) .	2 800	1 030	0	0	3 830
Nardaies ..... » .	1 090	445	0	0	1 535
Landes diverses ..... » .	770	325	1 010	0	2 105
Forêts ..... » .	2 890	1 850	2 620	0	7 360
Tourbières et lacs ..... » .	1 030	0	0	0	1 030
Total ..... » .	8 580	3 650	3 630	0	15 860
De 1400 m à 1600 m					
	Pâturages extensifs ; tourisme diffus (Extensive pastures ; slight tourism)				
Nardaies (ha)	410	200	0	0	610
Landes.. »	1 160	1 130	460	430	3 180
Total ... »	1 570	1 330	460	430	3 790
De 1600 à 1880 m					
	Pâturages très extensifs ; zone touristique très fréquentée (Very extensive pastures ; intense tourism)				
Pelouses et landes sommitales .	0	400	330	220	950
Total Nardaies ..... (ha) ..	1 500	645	0	0	2 145
Total Landes ..... » ..	1 930	1 455	1 470	430	5 285
Total toutes catégories » ..	10 150	5 380	4 420	650	20 600

d'aménagement et l'étendue des surfaces qui sont potentiellement aptes à divers types d'intervention pour l'amélioration des pâturages compte tenu de l'altitude, de la pente, de l'exposition générale des versants et de l'état actuel de la végétation.

A. — Définition des estives. Nature de la végétation

On peut définir l'« estive » comme le lieu d'un établissement temporaire de troupeaux limité à la belle saison. C'est un pâturage trop élevé ou trop éloigné du lieu d'hivernage pour être exploité et amendé par les fumures organiques d'une manière aussi intensive que les prés de fauche et les pacages situés autour des fermes. Elle est entretenue et exploitée par le parcage et le pacage intensif dans sa partie la plus accessible, par pacage extensif sur les parcours moins accessibles ou plus élevés.

Il résulte de ce mode traditionnel de mise en valeur, une maîtrise incomplète de la végétation avec extension de la Nardaie dans les parcours proches et des landes à *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus* et *Genista pilosa* dans les parties plus éloignées. L'envahissement par les plantes non fourragères, *Nardus* ou espèces suffrutescentes, reste toutefois étroitement lié à l'intensité de la fréquentation par le bétail. La pratique du parcage de nuit, l'épandage de fumier ou de lisier, un gardiennage mieux suivi ou la maîtrise des déplacements du troupeau par l'établissement de clôtures, l'augmentation de la charge de bétail, plus rarement le « girobroyage » et la fertilisation minérale, sont les outils de l'amélioration (Jeannin et De Montard, 1971 ; Petit et de Montard, 1974 ; De Montard et Gachon, 1973).

Ce système d'équilibre entre la végétation et la charge de bétail paraît stable et se maintient sans trop d'efforts, semble-t-il, au-dessus de 1 200 mètres sur les pentes aisément accessibles au bétail.

B. — Place des végétations pastorales. Concurrence avec d'autres modes de mise en valeur

1. — *Limites*

En-dessous de 1 150 ou 1 200 m d'altitude, *Cytisus scoparius* peut former rapidement des peuplements denses sur les pacages négligés. Il n'est pas rare d'observer dans la même enclosure un excellent pâturage à *Trifolium repens* et *Festuca rubra* entre 1 150 et 1 250 m d'altitude et une dégradation brutale en lande à *Cytisus scoparius* en-dessous de 1 150 m. L'état apparent de semi abandon que réalise l'envahissement par le genêt traduit une plus grande difficulté à maintenir les pâturages en bon état en-dessous d'une certaine altitude par la seule activité du bétail en raison d'un climat moins froid favorable à cette espèce. L'existence de jachères de cultures lorsqu'on se rapproche de la zone d'habitat permanent a été aussi un facteur prédisposant à la dissémination de cette espèce. Nous considérons la ceinture de landes de *Cytisus scoparius* qui entoure le massif vers l'altitude 1 150 m comme la limite inférieure des estives proprement dites où se pratique la transhumance.

Une limitation plus franche encore du domaine des estives est l'apparition des prairies de fauche et des établissements humains permanents. Cette limite se situe entre 1 200 et 1 300 m sur les versants Sud et Sud-Est du Massif et entre 1 100 et 1 200 m au Nord et au Nord-Ouest. Cette répartition dépend de la possibilité de faner dans des conditions satisfaisantes. En conséquence, les bons pâturages à *Trifolium repens* et *Festuca rubra* se situent principalement entre 1 100 et 1 300 m au Nord et au Nord-Ouest et remontent jusqu'à 1 400 m au Sud et au Sud-Est.

Le domaine ainsi délimité vers le bas par le contact avec les landes de *Cytisus scoparius* ou les prés de fauche s'étend sur 20 600 ha dont environ 15 500 (75 p. 100) sont situés sur des pentes inférieures à 40 p. 100, théoriquement propices au pâturage. Mais, à ce total, il faut enlever un peu plus de 1 000 ha (5 p. 100) de tourbières inexploitables et de lacs et 4 700 ha (23 p. 100 du total) de forêts. La mise en valeur forestière représente donc un concurrent sérieux des activités pastorales. Les plantations à base de résineux occupent environ un tiers des pentes modérées (de 0 à 20 p. 100) et un tiers des pentes moyennes (de 20 à 40 p. 100), soit respectivement 2 900 et 1 850 ha dont la plus grande partie était pâturée au siècle dernier.

Cette concurrence entre les deux modes de mise en valeur du sol se fait principalement sentir entre 1 100 et 1 300 m, c'est-à-dire dans une gamme d'altitudes où la forêt d'épicéa est encore productive et où se situent les estives les mieux entretenues à végétation de *Trifolium repens* et *Festuca rubra*. A cet étage, les pâturages extensifs à *Nardus* couvrent environ 1 500 ha et les landes à *Calluna* et *V. myrtillus* 2 100 ha. Ces surfaces peu productives pourraient être boisées apparemment sans grande nuisance pour l'élevage ; mais en réalité, mis à part 1 000 ha de landes situées sur des pentes supérieures à 40 p. 100, on pourrait envisager tout aussi bien un aménagement et une amélioration pour l'élevage au fur et à mesure que la crise d'adaptation à la production laitière exclusive aura été surmontée : un élevage de génisses de haute qualité est en effet une clé de l'avenir de ces exploitations laitières.

Au-delà de 1 300 m, la forêt a surtout un rôle de protection des pentes fortes et des têtes de ravins, éventuellement d'abri contre les vents, mais ce n'est déjà plus une forêt de rapport. Elle culmine difficilement vers 1 450-1 500 m en situations abritées mais ne s'établit guère en plein vent sur le plateau. Par contre, la vocation pastorale reste possible jusqu'à 1 600 m ; au-dessus, l'exiguité du territoire et la forte fréquentation touristique estivale ne laissent qu'une place très secondaire à l'activité pastorale.

Globalement, les surfaces de pentes inférieures à 40 p. 100 se situent dans la proportion des 4/5e entre 1 100 et 1 400 m d'altitude, soit environ 12 000 ha dont 3 800 ha de bons pâturages à *Festuca rubra*, 2 400 ha de nardaies et landes diverses et plus de 4 500 ha de forêts ; et dans la proportion d'un cinquième au-dessus de 1 400 m soit environ 3 000 ha de nardaies et de landes subalpines de valeur pastorale médiocre dans une zone hautement touristique. De fait, les meilleures estives et l'activité pastorale principale se situent assez bas et relativement à l'écart des circuits touristiques.

Toutefois, aux plus basses altitudes les promeneurs ne sont pas rares en été à proximité des routes et des sentiers de randonnées, parfois avec des chiens. Mais, l'interférence des deux activités, touristique et pastorale, malgré la gêne que peuvent en éprouver certains éleveurs trop bien placés, ne paraît pas dramatique pour cette dernière tandis que la première profite assez largement de l'entretien des parcours et de l'ouverture du paysage.

2. — *Productivité actuelle*

D'après les données d'une enquête de l'INERM (1) réalisée en 1972 sur la charge de bétail des pâturages d'altitude et d'après nos propres observations, les estives normalement chargées supportent en moyenne 0,8 UGB/ha (400 kg de poids vif/ha). Elles fournissent ainsi 3,5 UF/jour pour les besoins d'entretien et 1,2 à 2,4 UF/jour pour la production (l'équivalent de 400 à 800 g de gain de poids vif (2) par jour d'une génisse de 400 kg) ; c'est-à-dire 4,7 à 5,9 UF consommées par jour et par ha pendant 120 jours soit environ 560 à 710 UF/ha de production annuelle transformée.

Dans la réalité, les estives ne sont pas toutes chargées en proportion de leurs potentialités ; certaines restent même inutilisées. En rapportant le nombre d'UGB recensées à la surface des pentes inférieures à 40 p. 100, on obtient pour les Monts Dore, une charge réelle d'environ 0,6 UGB/ha c'est-à-dire une production de 420 à 530 UF/ha sur 9 750 ha soit 4,1 à 5,2 millions d'UF consommées.

Comparons cette production réelle aux potentialités de la végétation : d'après Molenat et Loiseau (3) la productivité de la « Nardaie » est de l'ordre de 500 UF/ha/an et nos propres travaux indiquent une productivité moyenne des pâturages à *Festuca rubra* d'environ 1 500 UF/ha/an (De Montard et Gachon, 1972). En fonction des surfaces recensées (tabl. 1), la production totale exprimée en UF consommable de ces deux types de végétation serait ainsi de 1,1 millions d'UF pour la « Nardaie » et 5,7 millions pour les pâturages à *Festuca rubra* soit 6,8 millions d'UF pour l'ensemble de ces deux faciès. Les landes constituent un appoint occasionnel très utile en période creuse mais difficilement chiffrable.

Ainsi, en 1972, la production utilisée sur les estives des Monts Dore représentait 60 à 80 p. 100 de la production théoriquement consommable sur les végétations de *Festuca rubra* et de *Nardus*. Ce résultat est conforme à celui de l'enquête pastorale de l'INERM qui comparait la charge potentielle déclarée par les utilisateurs à la charge réalisée. La charge potentielle déclarée et la charge potentielle déduite de l'état de la végétation aboutissent au même ordre de grandeur.

Il est possible de faire des calculs plus précis à l'échelle d'une unité d'estive par le calcul de la valeur pastorale. Daget et Poissonet (1971), calculant la valeur pastorale

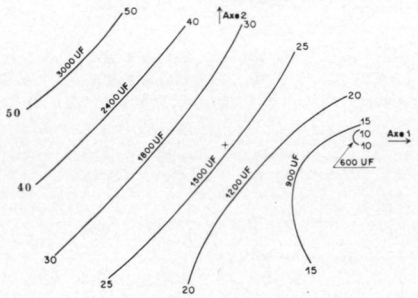


FIG. 2. — *Répartition des valeurs pastorales.*
Distribution of pastoral values.

(1) Institut National d'Etudes Rurales Montagnardes.
(2) Le croît dépend de l'état de l'animal à la sortie de l'étable, notablement.
(3) Communication orale.

à partir des relevés de fréquence des espèces et d'indices spécifiques de valeur fourragère, obtiennent une étroite corrélation entre la valeur pastorale et la charge actuelle de bétail exprimées en UF utiles à l'hectare, sur les pâturages de Margeride et du Cantal.

En utilisant la même méthode, nous avons étudié la répartition des productivités en fonction du type de pâturage en appliquant les valeurs pastorales, calculées relevé par relevé, sur le plan des axes 1 et 2 de l'analyse factorielle. On obtient ainsi une très grande régularité de répartition qui suggère un classement des productivités en relation avec les faciès de végétation (fig. 2) et l'intensité de la fréquentation par le bétail.

La concordance de la valeur pastorale avec les références expérimentales permet de l'utiliser pour connaître rapidement la valeur actuelle de telle ou telle

TABLEAU 2

Productivité selon le type de pâturage

Productivity according to the type of pastures

Faciès Espèces indicatrices	Fréquence sur 100 points	Productivité du pâturage en UF/ha/an d'après		
		La valeur pastorale	La matière sèche produite (0,6 UF/kg)	Les performances animales
Faciès 0 à Poa trivialis				
Poa trivialis	80-100	3 600 à 4 200	4 000-6 000	
et *Lolium perenne* (ou *Festuca prat.*, ...	50-100			
ou *Dactylis g.*, ou *Phleum p.*)				
Transition 0-1 { *Phleum pratense*	40-60	3 000		
Transition 0-1 { *Dactylis g.* ou *Lolium p.* .	20-40			
Faciès 1 à Trifolium repens et Festuca rubra				
1*a* *Phleum pratense*	20-40	2 400 à 3 000	3 000	2 800
ou *Poa pratensis*	30-50			
1*a bis* *Achillea millefolium*	40-50	1 800 à 2 400		
1*a ter* *Ranunculus acer*	60	2 400		
1*b* *Deschampsia cespitosa*.....	60-80	2 100		
1*c* *Poa chaixii*	40-60	1 800 à 3 000	3 000	2 200
1*d* *Avena pubescens*.....	40-60	1 500 à 2 400		
$1d_1$ *Helianthemum num*.....	20-40	1 200 à 1 400		
Transition 1-2				
Rhinanthus minor.....	20-30	900 à 1 200		
Trifolium repens	0-40	1 200 à 1 800	1 800	1 600
Mosaïque *Trifolium repens et Nardus* .		1 200		
Faciès 2 à Nardus stricta				
Nardus stricta	40-80	600 à 1 200	1 000	500 à 1 000
Succisa praemorsa	20-30	600 à 1 200		
Transition 2-3				
Galium saxatile	40-80	900 à 1 500		
Faciès 3 à Deschampsia flexuosa et Festuca duriuscula				
Deschampsia flexuosa	40-80	600 à 1 500	1 500	
Transition 3-4 et 2-4 av. *V. myrtillus*				
ou *Calluna* ou *Genista pilosa*	40-60	600 à 1 200		
Faciès 4 Landes à Vaccinium myrtillus, Calluna, Genista pilosa				
V. myrtillus ou *V. uliginosum* et *Calluna* ou *Genista pilosa*	60-100	600	700	

parcelle et de faire un ajustement correct de la charge de bétail lorsqu'on doit installer un troupeau sur un secteur dont la productivité est mal connue. Le caractère estimatif de cette méthode entraîne évidemment la nécessité d'un contrôle du bon comportement du bétail et l'observation de l'évolution des stocks d'herbe au cours de la saison.

Un œil exercé peut même se passer d'effectuer des relevés en repérant le faciès prairial (*Poa trivialis* ou *Trifolium repens* et *Festuca rubra* ou *Nardus stricta*, ou *Deschampsia flexuosa* et *Festuca duriuscula* ou lande à *myrtillus* et *Calluna*) et l'abondance particulière de l'une ou l'autre des espèces indicatrices que nous avons citées au tableau 2.

Cette méthode traduit seulement l'équilibre actuel de la végétation avec la conduite du pâturage et ne permet pas de calculer directement le potentiel d'amélioration.

C. — Les difficultés de l'amélioration pastorale

Tout aménagement ou toute amélioration de pâturage demeure sans effet si un effort important n'est pas réalisé pour assurer *une charge de bétail suffisante* et pour organiser le pâturage tournant de manière à maîtriser la végétation, à diminuer les refus par le broutage et le piétinement et assurer une revitalisation du milieu par une redistribution homogène des excréments.

Les végétations en bon état d'entretien, c'est-à-dire les pâturages à *Festuca rubra* et *Trifolium repens* posent peu de problèmes d'amélioration en raison d'une excellente aptitude à répondre aux facteurs de production, que ce soit le lisier et le parc des systèmes traditionnels ou les engrais minéraux azote, phosphore et potasse associés. La bonne valorisation de l'herbe produite exige une exploitation fréquente et intense de façon que le bétail se trouve sans cesse devant des repousses jeunes de haute valeur nutritive. La division en plusieurs parcs pâturés par rotation permet :

— de réaliser des charges instantanées élevées ;

— et de respecter les temps de repos pour la croissance de l'herbe qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif.

Les parcours à *Nardus stricta* sont difficiles à améliorer. Quatre saisons de 120 jours de pâture intensive avec une charge de dix brebis à l'ha, engrais PK et une rotation de pâture sur quatre parcs n'ont pas réussi à modifier sensiblement la composition botanique du tapis végétal (Loiseau, 1976). Le moyen de lutte traditionnel est le parcage de nuit mais cette méthode ne permet d'améliorer qu'une fraction du territoire et est coûteuse en main d'œuvre. La fumure organique ou minérale combinée à la fauche ont des effets favorables au terme de 3 ou 4 années mais c'est également une méthode coûteuse.

Les landes à *V. myrtillus* et à *Calluna* sont d'amélioration plus aisée (de Montard et Gachon, 1973 ; de Montard, 1976). On peut établir un tapis d'herbe dense productif en deux ou trois ans en combinant un « girogroyage » de départ, des fertilisations régulières et un pâturage intense. Le pâturage direct de la lande sans parcage ni apport de fertilisant favorise l'apparition de *Nardus stricta*.

L'implantation de cultures fourragères à la place de la « nardaie » ou des landes est une opération difficile en raison de l'abondance de la litière et du feutrage racinaire et de la très faible densité apparente des sols volcaniques d'altitude (d.a. = 0,4

dans les 10 premiers centimètres et 0,6 en profondeur). Le sol est fibreux et forme des mottes ; la terre fine, très riche en matières organiques, pulvérulente, très légère, se dessèche facilement, se tasse très mal et se révèle peu propice à un bon contact avec la graine et à une germination correcte. A ce titre, les sols plus grossiers des zones cristallines semblent beaucoup plus favorables.

En principe, on peut améliorer n'importe quelle végétation pour la ramener au type à *Festu a rubra* en supprimant les causes qui ont permis à la nardaie ou aux landes de se développer, c'est-à-dire en assurant une charge de bétail importante, en créant des clôtures pour pratiquer le pâturage tournant et en apportant des éléments fertilisants, mais ces opérations exigent un accès facile, des pentes praticables et entraînent des délais et des frais très variables selon l'état de la végétation en place.

D. — Classement des surfaces accessibles à une amélioration pastorale

Pour tenir compte des contraintes locales, éminemment variables, nous avons classé les surfaces pastorales des Monts Dore en quatre catégories :

Catégorie 1. — Pâturages à *Festuca rubra* sur pentes inférieures à 20 p. 100 (environ 2 800 ha).

Le niveau de production moyen le plus courant se situe autour de 1 500 UF consommées. L'épandage des engrais par épandeur centrifuge porté est relativement aisé ; leur action est immédiate et permet d'atteindre un rendement moyen de 2 500 UF/ha dès la deuxième année avec une fumure minérale apportant les doses 100 N, 50 P_2O_5, 100 K_2O (kg/ha/an).

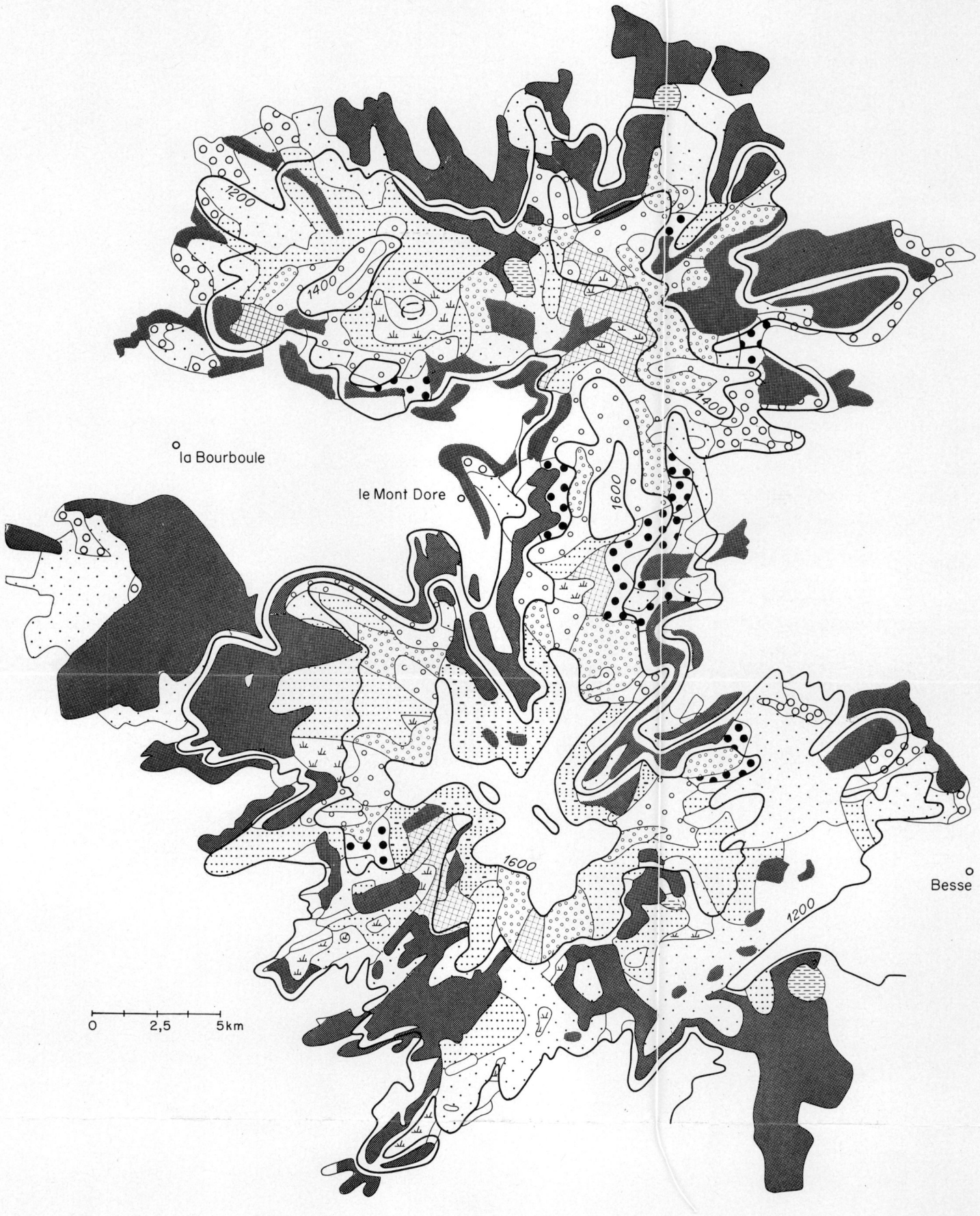
Catégorie 2. — Pâturage à *Festuca rubra* sur pentes moyennes de 20 à 40 p. 100 (environ 1 030 ha).

Le niveau de production peut être maintenu à 1 500 UF consommées si on assure le pâturage tournant et le couchage des animaux sur place mais l'épandage d'engrais est difficile par les moyens mécaniques. L'épandage d'acide phosphorique à la main peut être intéressant en utilisant une formulation riche enc haux à raison de 100 kg/ha P_2O_5 une fois tous les trois ans.

Catégorie 3. — Parcours à *Nardus stricta* et landes à *Calluna* et à *V. myrtillus* sur pentes inférieures à 20 p. 100 (environ 3 400 ha).

Les landes. — Les landes nécessitent une coupe au ras du sol et l'application d'engrais. Derrière *Calluna* ou *V. myrtillus* le tapis d'herbe met deux saisons à s'installer et entre en production la troisième année (de Montard et Gachon, 1973). Les expositions nord sont plus favorables à l'établissement d'une pelouse dense (à *Agrostis tenuis* et *Festuca rubra*) que les expositions sud : au Nord des apports phospho-potassiques, 50-100 kg par ha et par an, peuvent suffire ; au Sud, il faut y ajouter un apport annuel de 50 à 100 kg d'azote par ha.

La coupe à la faucheuse à fléaux non suivie de fertilisation entraîne, après quelques saisons de pâturage intense par des bovins, une multiplication de *Nardus stricta* (Melet et Loiseau, 1977).



échelle 1/100 000

FIG. 1. — *Carte de la végétation des pâturages des Monts Dore*
Map of types of pastures in Monts Dore
(F. de Montard et L. Gachon (1972))

Bois et forêts
Forest

Trifolium repens et *Festuca rubra*

Festuca rubra

Nardus stricta

Calluna V. et *Vaccinium myrtillus*

Pentes abruptes et rochers
Steep slopes and rocks

Deschampsia flexuosa

Cytisus scoparius

Genista purgans

Tourbières Peat-bog

Lacs Lakes

1 600 Ligne de niveau cote d'altitude 1 600 m
Limit of altitude

Le passage du rotovator au ras du sol permet au contraire une rapide éradication de *Calluna* sans multiplication ultérieure de *Nardus stricta*.

La nardaie. — D'après Loiseau *et al.* (1976), *Nardus stricta* est peu sensible au débroussaillage mécanique ; la seule période relativement favorable se situe à la pleine épiaison ; l'opération doit être combinée avec l'épandage préalable d'engrais et n'aboutit qu'à une éradication très partielle. Mais il ne faut pas considérer les « nardaies » comme des végétations improductives. Les premières conclusions de 4 années d'expériences menées avec des brebis indiquent une production de 500 UF en l'absence d'engrais et de 1 000 UF après 2 ans d'applications annuelles de 50 kg/ha de P_2O_5 et autant de K_2O, bien que la nature de la végétation n'ait pas varié.

Catégorie 4. — Parcours à *Nardus stricta* et landes à *Calluna* et à *V. myrtillus* sur pentes moyennes de 20 à 40 p. 100 (environ 2 500 ha).

La voie d'amélioration passe par la seule action du bétail c'est-à-dire par l'augmentation progressive de la charge et le pâturage tournant. La productivité, de l'ordre de 500 UF/ha/an dans beaucoup de situations, peut être lentement accrue par des transferts de fertilité, si les troupeaux peuvent circuler à la fois sur la lande et sur des surfaces adjacentes plus fertiles. Lorsqu'on accroît la charge de bétail sur les landes à *Calluna* et *V. myrtillus*, il se produit une lente évolution vers une végétation herbacée, très variable selon le type de bétail : les bovins et surtout les ovins favorisent l'extension de *Nardus stricta* ; par contre les chevaux peuvent le maîtriser.

D'après Melet et Loiseau (1977), le pâturage intense d'une callunaie-myrtillaie par des bovins pendant cinq saisons successives conduit à la régression de *Calluna*, à la stabilité de *V. myrtillus* et à une extension du tapis herbacé. *Nardus stricta* reste discret dans les stations où il était peu représenté à l'origine mais s'accroît fortement dans les stations où il était déjà bien implanté, jusqu'à constituer 16 p. 100 du recouvrement.

E. — Potentialités d'amélioration

Sur ces bases, nous pouvons exprimer les potentialités d'amélioration de l'ensemble des estives des Monts Dore en calculant les conséquences d'efforts progressifs exercés pour transformer la végétation et pour en augmenter les rendements. Dans le tableau 3, le rendement en UF exprime non seulement la possibilité mais aussi l'obligation de réaliser le chargement de bétail correspondant. Car si celui-ci n'est pas réalisé, les efforts techniques sont moins efficaces et la végétation ne s'améliore pas.

La productivité actuelle des pâturages du massif est à peu près équivalente à 70 p. 100 de celle qu'on obtiendrait avec le pâturage libre à l'intérieur des périmètres clôturés. Cette coïncidence est en partie due au hasard : à côté d'estives effectivement conduites en pâturage libre, certaines sont conduites en pâturage tournant et d'autres sont sous chargées ou abandonnées ; et ceci compense cela. Quoiqu'il en soit dans le détail, le pâturage libre représente une situation moyenne et la généralisation du pâturage tournant avec adaptation correcte des chargements selon l'état de la végétation permettrait à lui seul d'augmenter les ressources consommables de 50 p. 100 en 3 ans. Lorsque la maîtrise du pâturage tournant et l'adaptation des chargements sont acquises, les autres améliorations peuvent intervenir avec un ajustement progressif de l'effectif des troupeaux.

TABLEAU 3

Production potentielle des estives des Monts Dore en fonction des efforts d'amélioration consentis
Potential production of pastures and rough grazings of Monts Dore dependent on the amelioration efforts

Végétation	Pente p. 100	Surface (10^3 ha)	Code des améliorations													
			0		1		2		3		4		5		6	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Festuca rubra	0-20	2,8	1,5	4,2	1,5	4,2	1,5	4,2	1,8	5,0	2,5	7,0	2,5	7,0	2,5	7,0
	20-40	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Nardaies	0-20	1,5	0,3	0,5	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9	1,0	1,5	1,0	1,5
	20-40	0,7	0,2	0,1	0,4	0,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
Landes	0-20	1,9	0	0	0,3	0,6	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	2,9
	20-40	1,9	0	0	0,2	0,4	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8
Prod. totale				5,8		7,6		8,8		9,6		11,6		12,2		14,1
Gains partiels ..								+ 1,2		+ 0,8		+ 2,0		+ 0,6		+ 1,9
Grains cumulés .						+ 1,8		+ 3,0		+ 3,8		+ 5,8		+ 6,4		+ 8,3

Nature des améliorations :
0 = Pâturage libre
1 = Pâturage tournant 1re année
2 = Pâturage tournant 3e année
3 = 2 + Apports PK sur *Festuca rubra* des pentes 0 — 20 p. 100
4 = 2 + Apports NPK sur *Festuca rubra* des pentes 0—20p. 100
5 = 4 + Apports PK sur nardaie des pentes 0 — 20 p. 100
6 = 5 + Débroussaillage et PK sur landes des pentes 0 — 20 p. 100, en 3e année après le débroussaillage.
a = Production en milliers d'UF par ha et par an.
b = Production totale par type de végétation et par classe de pente, en millions d'UF.

L'amélioration la plus efficace est ensuite l'apport d'engrais minéraux azote, phosphore et potasse sur les faibles pentes couvertes par le faciès à *Festuca rubra* ; mais elle présente l'inconvénient de nécessiter plusieurs interventions dans l'été pour l'apport de l'engrais azoté. Les apports de phosphore et potasse sans azote ont une efficacité modeste. Le débroussaillage des landes n'a d'effet que couplé avec une fertilisation PK ou NPK et la nouvelle pelouse ne devient productive qu'à partir de la troisième année ; il s'agit donc d'un investissement foncier à moyen terme, assez efficace cependant, surtout si on y associe un chaulage léger (0,5 à 1 t/ha).

Au total, l'adoption généralisée du pâturage tournant et l'amélioration systématique de tous les pâturages et landes situés sur les pentes modérées permettraient plus que le doublement du chargement actuel, mais cette perspective doit être tempérée par les difficultés de l'intégration des ressources fourragères des estives dans les systèmes de production des exploitations agricoles.

Conclusion

1) L'établissement de la carte des principaux faciès de végétation pastoraux des Monts Dore, nous a conduits à reconnaître l'influence considérable de la pente et de l'altitude sur leur répartition et sur la répartition des activités pastorales dans l'espace.

Le domaine pastoral s'étend sur 12 200 ha environ, les forêts sur 7 400.

Les meilleurs pâturages, à *Festuca rubra*, couvrent un peu plus de 2 000 ha entre 1 100 et 1 600 m, et pour les 3/4 également sur des pentes inférieures à 20 p. 100. Ils couvrent seulement 600 ha entre 1 400 et 1 600 m. Les pâturages à *Festuca rubra* et *Nardus stricta* restent confinés aux pentes inférieures à 40 p. 100.

Les landes couvrent plus de 5 000 ha dont 3 200 au-dessus de 1 400 m. Jusqu'aux altitudes les plus élevées, on peut rencontrer des faciès franchement prairiaux assez étendus, en bonne exposition et des nardaies localisées aux combes à neige.

L'examen général de la répartition des végétations montre que les pentes supérieures à 40 p. 100 sont peu favorables à un pâturage assidu et sont de préférence couvertes de landes ou de végétations non pâturées (*Brachypodium pinnatum*, *Festuca paniculata*...).

2) La connaissance de la composition botanique permet le calcul d'un indice de valeur pastorale assez représentatif de la production actuelle du pâturage ; Par ailleurs cette composition botanique est très étroitement dépendante de la fréquentation des animaux, du mode de conduite de la pâture et des engrais organiques ou minéraux utilisés.

Dans la fourchette de productivité 500 à 1 500 UF/ha/an, le chargement en bétail et le mode de pâture, libre ou tournant, ont une influence prépondérante sur l'état de productivité d'une estive.

Pour dépasser les 1 500 UF/ha/an, il faut faire intervenir, en plus du pâturage tournant, le fumier, le lisier ou les engrais chimiques, sans se départir d'une bonne méthode d'exploitation, c'est-à-dire d'un chargement réajusté aux nouvelles possibilités.

Les délais d'amélioration des pâturages varient grandement selon leur état de départ : les pâturages à *Festuca rubra* et *Trifolium repens* s'améliorent très rapidement et réagissent très favorablement aux engrais organiques ou minéraux. Partant du niveau 1 500 UF on peut dès la deuxième année de fumure, atteindre des productions variant entre 2 000 et 3 000 UF selon l'importance de la fumure azotée.

Les « nardaies » sont d'amélioration difficile et peuvent stagner vers 1 000 UF pendant 5 ou 6 ans avant d'amorcer une évolution appréciable vers un pâturage à *Festuca rubra*.

Après un broyage préalable, les landes fertilisées donnent un gazon dense et productif d'*Agrostis* et de *Festuca rubra* dès la troisième année.

S'il n'y a pas d'apports fertilisants, le pâturage intensif d'une lande à *Calluna* et à *V. myrtillus* par des bovins ou des moutons ou son broyage, sont favorables à l'extension de *Nardus stricta*.

Reçu pour publication en octobre 1978.

Remerciements

Nous remercions cordialement nos collègues A. Langlet (Agronomie I.N.R.A., Centre de Recherches de Toulouse) et B. Jeannin (S.E.I., I.N.R.A., Centre de Recherches de Versailles) pour les conseils apportés dans la rédaction de ce texte.

Summary

Ecology of the Monts Dore pastures

II. — *Repartition and geographical extension of pastoral facies of vegetation*

On the basis of pastoral facies classification determined in a previous paper, a map of pastures and rough grazings of Monts Dore is given at 1/100 000 scale.

Repartition of facies with altitude and slope is studied.

Ecological modalities of concurrence between pastoral activities and other soil uses such as removed meadows, forestry and tourism, are studied : altitude, slope and exposure are determinant.

About 66 p. 100 of annual grass production are now used for pasture, chiefly by cattle, and to a much less extent by sheep.

Rotational grazing and amelioration of pastures by mechanical removal and fertilization of *Nardus s.* rough grazings and *Calluna*, *V. myrtillus* and *V. uliginosum* heaths on moderate slopes, would allow twice the number of cattle than at present to be fed.

Zusammenfassung

Ökologie der Weiden der « Monts Dore »

II. — *Verteilung und geographischer Umfang der Weidenvegetationsfazies*

Aufgrund der in einem früheren Bericht festgestellten Weidentypologie werden die verschieden Fazies der Sommerweiden der « Monts Dore » zu 1/100 000 stel kartographisch aufgenommen und in Zusammenhang mit der Höhenlage und dem Hang studiert.

Die Konkurrenz der Weidentätigkeit mit anderen Bodennutzungen : Wiese, Wälder und Tourismus, ist coird unter dem ökologischen gesichtspunkt untersucht : die Höhenlage, der Hang und die Lage spielen eine vorherrschende Rolle.

Die Grasproduktion ist ungefähr zu 2/3 genutzt. Der allgemeine Übergang zur Umtriebsweide und die schohende, systematische Verbesserung, durch mechanisches Gestrüppentfernen und Fruchtbarmachung der auf den mässigen Abhängen liegenden Weiden und Heiden könnten es ermöglichen, den Sommerviehbestand zu verdoppeln.

РЕЗЮМЕ

Экология горных пастбищ мон-дор.

II. — Распределение и географическая протяженность сортов пастбищной растительности.

Ф. ДЕ МОНТАР, Л. ГАШОН.

На базе пастбищной типологии, являвшейся предметом пред'идущей работы, изучались в зависимости от высоты над уровнем моря и склона, и картографировались в масштабе 1/100 000, различные категории горных пастбищ Мон-Дор.

Конкурренция между пастбищной активностью и иными применениями почвы, укосными лугами, лесами и туристической активностью, анализировалась с экологической точки зрения : высота над уровнем моря, склон, и экспозиция играли при этом главенствующую роль.

Приблизительно 2/3 травяной продукции идет на потребление. Обобщение ротационного выпаса и систематическая мелиорация (механическая прополка кустарников и фертилизация пастбищ и пустошей расположенных на умеренных склонах) позволят, по всей вероятности, удвоить поголовье выпасающегося летом скота.

Références bibliographiques

DAGET Ph., 1972. Comparaison entre la charge de bétail et la valeur pastorale. In G. Long, 1975. *Diagnostic phyto-écologique* et aménagement du territoire, t. II, p. 134, fig. 77.

JEANNIN B., de MONTARD F., 1971. Fertilisation et Pâturage tournant sur une estive des Monts d'Auvergne. *Fourrages*, **45**, 49-69.

GACHON L., de MONTARD F., 1973. Les relations entre l'herbe et l'animal, bases de l'Aménagement des Pâturages d'Altitude : Application au Massif des Monts Dore, 98e *Congrès National des Sociétés Savantes*, Saint-Etienne. C. R. t. 1, 331-337.

LOISEAU P., MERLE G., 1976. Effet du pâturage tournant des ovins sur une pelouse à Nard. 11e *réunion du groupe FAO des herbages européens de montagne*, Nyon Suisse ; 13-15 juill. 1976, doc. ronéo, 9 p.

MELET L. et LOISEAU P., 1977. *Utilisation d'une lande dégradée par des bovins*. Doc. ronéo, 8 p. Station d'Agronomie Clermont-Ferrand.

MOLENAT G., BECHET G., LOISEAU P., 1976. Le régime alimentaire des brebis sur un pâturage de montagne à base de Nard. 11e *réunion du groupe FAO des herbages européens de montagne*. Nyon Suisse, doc. ronéo, 8 p.

de MONTARD F., GACHON L., 1972. Composition botanique et production des pâturages en Auvergne. 9e *réunion du groupe FAO des herbages européens de montagne*. Brasov Roumanie 27-30 juin 1972, doc. ronéo, 13 p.

de MONTARD F., GACHON L., 1973. Régénération des pâturages sur le Massif du Forez à partir de la végétation spontanée d'une lande à *Calluna vulgaris*. 98e *Congrès National des Soc. Savantes*. Saint-Etienne. C. R. t. 1 ; 321-329.

de MONTARD F., PETIT M., SAUVAIRE A., 1974. Utilisation d'un pâturage d'altitude des Monts Dore par des génisses en croissance. *Bull. Tech. CRZV de Theix*.

de MONTARD F., 1976. Amélioration de la productivité et mobilisation d'éléments nutritifs d'une lande à *Calluna vulgaris* du Massif du Forez sous l'effet de la fauche, de la pâture et de la fertilisation. 11e *Réunion du groupe FAO des herbages européens de montagne*. Nyon Suisse ; doc. ronéo, 10 p.

de MONTARD F., GACHON L., 1978. Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. I. Application de l'analyse factorielle des correspondances à l'analyse de la végétation. *Ann. agron.*, **29** (3), 277-310.

Ann. agron, 1978, **29** (4), 419-420.

Chronique des livres

SZEGI J. — *Soil biology and conservation of the biosphere.* Akadémiai Kiado, Budapest (Hongrie) 424 p., 1977.

Cet ouvrage présente les communications du VIIe meeting de Biologie des Sols qui s'est tenu en Septembre 1975 à l'Université Keszthely d'Agriculture de Hongrie. Des spécialistes de quatorze pays ont présenté cinquante quatre courtes communications (de 4 à 5 p.).

Dans ce type d'ouvrage, les sujets abordés sont très différents et l'importance de chaque papier assez irrégulière. Pour en faciliter la lecture un classement en six sections a été fait :

— Interaction entre les organismes du sol et les produits chimiques d'usage agricole ;
— Rôle des microorganismes du sol dans la transformation des éléments nutritifs des plantes ;
— Interaction entre légumineuses et rhizobium ;
— Rôle des organismes du sol dans la décomposition des résidus végétaux ;
— Organismes du sol en tant que composants de l'écosystème sol ;
— Rôle des microorganismes dans les processus de formation du sol.

Le thème central de ce livre, qui intéressera un grand nombre de lecteurs (biologie du sol, écologie agricole, alimentation minérale, chimie agricole...) est la protection et la conservation de l'environnement face aux techniques agricoles, et le rôle que peut jouer dans ce sens la biologie du sol.

R. B.

BUNNING Erwin. — *Die physiologische Uhr — Circadiane Rhythmik und Biochronometrie* (« L'horloge physiologique » — rythmes circadiens et biochronométrie). 3e édition profondément remaniée, Springer Verlag, 176 p., 1977.

Ce livre donne une information de base sur les rythmes biologiques (surtout à l'échelle de la journée) chez les plantes, les animaux et les hommes.

La 3e édition en langue allemande de « l'horloge physiologique » succède à de nombreuses éditions en langues anglaise, russe, chinoise etc... et procède à une importante mise à jour compte tenu de nombreux récents travaux parus sur la question.

Les quatre premiers chapitres situent le sujet traité, d'abord de façon générale (ch. 1), puis à l'aide d'exemples (ch. 2) et enfin en posant la question de l'apparition et de la disparition des rythmes dans un organisme (ch. 3) et au niveau des cellules (ch. 4).

Les chapitres suivants analysent l'effet de différents facteurs : température (ch. 5), lumière (ch. 6) sur la cinétique des oscillations (ch. 7) et proposent des hypothèses explicatives au niveau biochimique et biophysique (ch. 8) de l'horloge interne et de son harmonisation avec les rythmes cosmiques (ch. 9).

Les quatre autres chapitres suivants traitent de la nécessité de l'existence d'un repère du temps (ch. 10) pour l'entretien des rythmes qu'ils soient circadiens, liés aux marées ou lunaires (ch. 11) et de leur dépendance par rapport aux facteurs externes (ch. 12) qui permet aux organismes vivants de mesurer la durée du jour (ch. 13).

Enfin, le dernier chapitre (ch. 14) aborde les déviances pathologiques qui peuvent affecter l'horloge interne.

Il est à noter que les nombreuses figures qui illustrent le livre aident à bien saisir la complexité du sujet traité.

L. C.

LEEPER G. W. — *Managing the heavy metals on the land.* Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1978, 120 p., 100 réf. bibliogr.

Cet ouvrage relativement court ne se présente pas comme une revue encyclopédique de nos connaissances actuelles sur les métaux lourds en agronomie, mais cherche surtout à dégager et à expliquer les principaux phénomènes relevant des interactions entre les métaux lourds et le sol ou la plante. Il expose clairement les bases scientifiques concernant les formes et le comportement des métaux lourds dans les sols et dans les végétaux supérieurs, les avantages et les inconvénients de l'utilisation agricole de déchets solides ou liquides et les questions que pose à ce sujet la présence de métaux lourds. L'auteur insiste surtout sur le zinc, le cuivre, le cadmium, le nickel et le plomb. Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui se trouvent confrontés avec l'utilisation de déchets et avec les problèmes théoriques et

pratiques ainsi soulevés. Un résumé de 12 pages présente l'essentiel de ce que doivent connaître ceux qui sont peu familiarisés avec ces questions.

S. T.

GRIBBIN John. — *Climatic Change*. Cambridge University Press, Cambridge (G. B.), 280 p., 1978.

Les récentes sécheresses en Afrique, Ethiopie, Inde ont sensibilisé aux problèmes des changements climatiques. Dans le même temps, les travaux sur l'histoire de notre planète et sur les échanges atmosphériques de grande échelle apportent une meilleure compréhension sur les mécanismes en jeu.

Ce livre tente de faire le point de l'état actuel des recherches dans ces différents domaines. Dans un premier temps les variations climatiques du passé sont étudiées aux différentes époques depuis les glaciations jusqu'à l'histoire actuelle. Puis le bilan thermique global de la terre est discuté ainsi que les changements récents des neiges et glaciers. Après avoir envisagé les influences astronomiques possibles à court et long terme, des modélisations du climat global sont présentées en insistant sur le rôle des océans. Enfin l'influence de l'homme sur le climat, mais aussi celle du climat sur les activités humaines (et en particulier sur la production agricole) servent de conclusion à cet ouvrage.

Chaque article, suivi d'une bibliographie, est écrit par un spécialiste mondial du domaine concerné. Des index matière et auteur complètent ce livre qui peut servir de base à ceux qui sont intéressés par les changements climatiques.

R. B.

Transport et transfert processes in plants, Edited by I. F. Wardlaw and J. B. Passioura, New York, Academic Press, 1976, 484 p.

Ce volume est le compte rendu d'un symposium organisé dans le cadre de la coopération australo-américaine et qui s'est tenu à Canberra en 1975. Les phénomènes de transport y sont envisagés à trois niveaux différents : sur de courtes distances (c'est-à-dire principalement le niveau cellulaire) sur de longues distances (au niveau d'un organe et d'un organe à un autre) et enfin à travers toute la plante.

Dans la section se rapportant au transfert à courte distance, la plus volumineuse des trois, 19 articles de sujets aussi différents que le rôle des plasmodesmes, le mouvement des solutés depuis l'hôte jusqu'au parasite (cas des racines infestées par les nématodes), l'électrophysiologie des racines, le loading du phlœme, la régulation et le transport des ions, des auxines, du carbone 14, d'un certain nombre de métabolites, sont abordés. Par contre, il y est peu discuté des mécanismes de transfert des ions à travers les membranes sur lesquels il existe par ailleurs une abondante littérature. Parmi les nombreuses conclusions qu'on peut retenir de cette section citons-en une : le fait que les processus de passage des ions et des métabolites à travers les tissus ne sont pas nécessairement les mêmes dans la partie aérienne et dans les racines.

Dans la section concernant le transport à longue distance, les questions relatives aux mécanismes de transfert à travers le phloème — déjà envisagées dans la section précédente avec en particulier un tableau récapitulatif très clair des différents modèles et hypothèses en présence (p. 5) — sont reprises et largement discutées. On y trouve aussi parmi d'autres un article sur le transport du virus de la mosaïque du tabac à travers le corps de la plante, l'influence du comportement des stomates sur le transport de l'eau et sur la translocation d'une récapitulation des diverses relations trouvées expérimentalement entre le potentiel hydrique des feuilles et la transpiration.

Pour ce qui est du transport des hormones à travers la plante notre connaissance est encore très faible : pour la plupart de ces substances on ne sait pas de façon sûre où elles sont produites, par quelle(s) voie(s) elles transitent et quelle est leur destination finale. Un grand nombre d'études concernant ces questions proviennent d'expérimentation faites sur des tissus isolés et ne peuvent donc s'appliquer directement à la plante intacte.

La dernière section intitulée littéralement « systèmes intégrants » est peut-être un peu décevante par rapport au titre prometteur — le contrôle du mouvement de l'eau à travers la plante, les diverses implications du modèle « sources-puits » de répartition des assimilats dans la plante, la mobilisation et le cycle de divers nutrients forment autant d'articles. Cependant il faut bien reconnaître que notre compréhension de « l'intégration » de ces divers mécanismes dans la plante entière reste encore extrêmement sommaire. Dans ces conditions il est certain, comme le souligne la discussion, que l'étude de la plante entière en conditions normales doit devenir l'une des voies de recherches essentielles étant donné son importante quant à notre compréhension de la physiologie des cultures et de la productivité agricole.

Des schémas bien présentés et quelques photos éclairent le texte. Un effort a été fait pour traiter les deux aspects — structure et fonctions — des phénomènes. Chaque section comporte à la fin un résumé — discussion.

Ce volume est avant tout utile par la multiplicité des éclairages qui sont donnés par les différents auteurs sur les sujets abordés et par les quelques « mises au point » claires qu'il comporte. Le livre se termine par un index matières et plantes très complet.

P. C.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 1-1979

Dépôt légal : 1er trimestre 1979. N° d'impression : 25995

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1978	France	Étranger	Le N°
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 n°s par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 n°s par an	287 F	315 F	69 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 n°s par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOLOGIE-ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 n°s par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 n°s par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 n°s par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 n°s par an	223 F	247 F	69 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 n°s par an	254 F	281 F	85 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 n°s par an	254 F	281 F	90 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 n°s par an (1)	300 F	330 F	65 F
ANNALES D'HYDROBIOLOGIE (2)			

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

(2) *Les Annales d'Hydrobiologie* cessent de paraître à partir de 1978.

APIDOLOGIE, 4 n°s par an — Abonnement : France : 64 F — Étranger sauf R. F. A. : 75 F
— Le numéro : France : 21 F — Étranger sauf R. F. A. : 27 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... 230,00 F

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... 55,00 F

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... 300,00 F

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... 80,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... 53,50 F

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... 52,00 F

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... 35,00 F

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... 150,00 F

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... 150,00 F

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... 85,00 F

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... 58,85 F

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... 120,00 F

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... 160,50 F

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1978, **29** (4), 311-420.

Table des matières

P. CHASSIN, Brigitte LE BERRE. — Mesure de l'aire de la surface totale des argiles avec l'éthanediol. Protocole expérimental et méthode de calcul 311

D. TESSIER. — Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation 319

R. MOREL. — Quelques aspects nouveaux de la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol 357

J. L. CHARPENTEAU, J. P. RELLIER. — Essai d'une méthodologie d'étude de l'évolution de quelques caractéristiques de la couche arable sur un dispositif expérimental avec rotations 381

F. de MONTARD, L. GACHON. — Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. II. — Répartition et extension géographique des faciès de végétation pastoraux 405

Chronique des livres 419

Contents

P. CHASSIN, Brigitte LE BERRE. — Measurement of specific area of clay minerals by the ethanediol. Experimental procedure and calculation method 311

D. TESSIER. — Study of the organisation of calcic clays. Evolution during shrinkage .. 319

R. MOREL. — Some new aspects of carbon and nitrogen dynamics in the soil 357

J. L. CHARPENTEAU, J. P. RELLIER. — Experimental methodology for studying the evolution of some characteristics of the surface soil on an experimental system with crop rotations 381

F. de MONTARD, L. GACHON. — Ecology of the Monts Dore pastures. II. — Repartition and geographical extension of pastoral facies of vegetation 405

Books review 419

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 8-036-004-5

Cachet

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 5

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 29 (5) 421-524 (1978)
FR ISSN 0003-3839.

AAG
29.5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— M. HALLAIRE, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— J. PONCHET, Chef du Département de Pathologie végétale, 06602 Antibes.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

Notice nécrologique

Jean CHAUSSIDON

Jean CHAUSSIDON, Chef du Département de Science du Sol, est décédé le 9 septembre dernier. Avec lui disparaissent à la fois un chercheur de qualité exceptionnelle et un chef de département d'une très grande compétence qui avait su gagner la confiance et le respect de tous ceux qui dépendaient de son autorité.

Entré à l'I. N. R. A. en 1953 à sa sortie de l'I. N. A., il s'était aussitôt attaché à développer des recherches de caractère fondamental dans le domaine de la physico-chimie des constituants du sol. Convaincu de l'importance de la chimie des surfaces dans les propriétés des sols, il devait consacrer tout au long de sa carrière une grande part de son activité de chercheur à ce thème.

Après sa thèse de doctorat d'état, soutenue en 1961, il réunit autour de lui une équipe qu'il orienta d'abord vers l'étude des minéraux argileux puis progressivement vers d'autres thèmes tels que les phénomènes de transfert dans les milieux poreux, les interactions pesticides sols ou les relations entre les états de l'eau et la porosité ; thèmes pour lesquels il devait, avec succès, provoquer une coopération entre différents laboratoires du Département de Science du Sol. Il avait en effet le désir profond d'accroître la cohésion et l'efficacité du Département dont il avait la charge. Cet objectif a été atteint grâce à la conviction et à l'énergie dont J. CHAUSSIDON fit preuve jusqu'à la limite de ses forces.

Malgré les lourdes responsabilités qui lui incombaient, il s'efforça de garder le contact avec le travail de laboratoire, car il était un chercheur dans l'âme. C'est d'ailleurs par la qualité de ses recherches personnelles qu'il avait acquis sur le plan international une autorité incontestée dans le domaine de la physico-chimie des minéraux argileux. L'originalité de sa démarche dans l'analyse des propriétés physiques et physico-chimiques des sols et son esprit de novation assureront à son œuvre la pérennité.

J. Mamy

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (5), 421-438.

Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières de sols calcaires

Nicole SOUTY

avec la collaboration technique de Colette RODE

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Nous avons considéré une collection de sols calcaires de provenance variée et avons étudié leurs caractéristiques de constitution et quelques-unes de leurs propriétés liées à leur organisation : capacité d'échange, humidité équivalente, porosité texturale et sensibilité au compactage. Les résultats des analyses granulométriques sans et avec décarbonatation et l'interprétation de l'interaction matière organique-phyllite permettent de conclure que le carbonate de calcium fin semble être la meilleure caractéristique constitutive de l'effet calcaire.

Pour les propriétés, nous avons trouvé que la capacité d'échange diminue avec une augmentation de calcaire fin ; la valeur de l'humidité équivalente peut être exprimée par une relation tenant compte de la constitution carbonatée de la fraction $< 2\,\mu$ et la porosité augmente avec la teneur en calcaire fin.

Sous l'influence de facteurs mécaniques, l'assemblage élémentaire peut subir des mofifications et la teneur en eau de la phyllite au point singulier de la courbe de sensibilité au compactage est, elle aussi, fonction de la teneur en calcaire fin. Le rôle essentiel du calcaire fin est ainsi mis en évidence.

Introduction

D'après Pédro (1972), les affleurements rocheux contenant du carbonate de calcium occupent près de 10 p. 100 de la surface du globe terrestre. Même si l'on tient compte de l'existence de sols totalement décarbonatés développés sur roche calcaire, on doit donc admettre l'importance générale des sols calcaires, importance encore accrue dans certaines régions du globe telles que le pourtour de la Méditerranée et singulièrement, le Sud-Est de la France.

Malgré cela, on dispose de relativement peu d'informations spécifiques sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux calcaires bien que certains travaux montrent qu'ils peuvent avoir des comportements particuliers.

Les différences observées portent notamment :

— sur la dynamique et l'influence des matières organiques (Monnier, 1965) sur les propriétés physiques,

— sur les caractéristiques hydriques (Chiaverini, 1976),

— sur la porosité texturale fréquemment anormalement élevée (Guérif, 1974),

— sur les caractéristiques mécaniques, notamment l'entrée en plasticité (Faure, 1976).

D'un point de vue méthodologique, l'utilisation classique des données de l'analyse granulométrique pour caractériser le matériau constitutif d'un sol et tenter d'en prévoir les propriétés et comportements est délicate dans le cas des sols calcaires pour lesquels la notion de granulométrie est en effet particulièrement complexe :

— En premier lieu, on ne peut plus se baser sur une correspondance, au moins approximative, entre classes granulométriques et constitution minéralogique — qui est la règle générale à quelques exceptions près (terres de Boulbène — Marty, 1969) pour les matériaux non calcaires. En particulier, la classe granulométrique $< 2\ \mu$ n'est plus assimilable au groupe minéralogique des phyllites mais peut contenir des quantités variables et parfois importantes de calcite très divisée.

— En second lieu, la stabilité de la distribution granulométrique n'est pas assurée. Bien que peu soluble, le carbonate de calcium peut passer en solution ou précipiter suivant la pression partielle de CO_2 dans le sol. Les variations des conditions physicochimiques prévalant dans le sol sont donc susceptibles d'entraîner des modifications de granulométrie dans la mesure où le carbonate de calcium peut, selon les cas, cimenter ou libérer des particules élémentaires définies par un type donné d'analyse granulométrique. D'autre part, la granulométrie même des fractions carbonatées après broyage est très hétérogène comme on peut le constater au scanning en observant les diverses populations de limons et sables calcaires (ce qui est différent dans le cas des quartz) ; de plus, ce broyage éloigne l'analyse « laboratoire » des données « terrain ».

* * *

En tenant compte des considérations précédentes, nous nous sommes proposés, à partir d'une collection de trente matériaux issus de sols calcaires, de rechercher des paramètres spécifiques de constitution permettant de rendre compte d'une série de propriétés physicochimiques et physiques susceptibles d'être influencées par leur constituant minéralogique caractéristique.

Dans une première étape qui fait l'objet de ce mémoire, nous avons utilisé essentiellement une approche statistique destinée à mettre à jour les recherches les plus importantes à entreprendre au niveau des mécanismes. Elle a consisté à tester la validité des modèles d'ajustement efficaces en l'absence de calcaire et aussi à introduire de nouveaux paramètres traduisant l'influence supposée de telle ou telle caractéristique de la constitution granulométrique *et* minéralogique des sols étudiés.

Après avoir présenté la collection de matériaux, support de l'étude, nous analyserons leur constitution que nous essayerons de relier à un ensemble de propriétés dépendant plus ou moins étroitement de l'organisation en assemblage des particules dites élémentaires.

I. — Matériaux calcaires étudiés

Compte tenu des objectifs et de la méthode retenue, nous nous sommes efforcés d'atteindre une variabilité suffisante quant à l'origine et la constitution des matériaux

étudiés, sans pour autant viser une représentativité illusoire d'une famille de constitutions et d'évolutions pédogénétiques aussi diverses.

Origine des matériaux

Dans cet ensemble de ce fait quelque peu disparate, nous avons retenu quelques sous-ensembles regroupant chacun des matériaux d'origines similaires, ne se distinguant les uns des autres que par des aspects quantitatifs de leur constitution.

La collection se trouve composée des matériaux suivants :

— sols sur dépôts fluviatiles et palustres de la glaciation wurmienne (Paluds de Vaucluse),
— sols sur alluvions limoneuses de Vitrolles (Bouches-du-Rhône),
— sols bruns calcaires des plateaux de Bourgogne,
— sols sur roche mère d'origine détritique : poudingues de Riez et de Valensole,
— sols sur roche mère calcaire : éboulis stabilisés,
— sols de Rendzine sur craie de la Marne,
— sol alluvial calcaire hydromorphe (dit « Bouchot » de Charente).

Caractéristiques générales de constitution

Les résultats obtenus par Guérif (1974) suggèrent que la spécificité de comportement physique des sols calcaires n'apparaît clairement que pour des teneurs en calcaire total supérieures à 40 p. 100, aussi avons-nous choisi les matériaux étudiés dans une gamme de teneur en $CaCO_3$ élevée puisqu'allant de 34,4 à 93,4 p. 100.

Une représentation synoptique de leur constitution figure sur le diagramme triangulaire de texture simplifié de la figure 1.

Sous les réserves imposées par le mode d'obtention de ces résultats (cf. ci-après la méthode d'analyse granulométrique utilisée), ce diagramme permet d'apprécier la diversité de la granulométrie, simultanément à la nature minéralogique de l'échantillon des matériaux étudiés.

Si l'on considère les matériaux non décarbonatés, on constate que, malgré la diversité recherchée de leur origine, ils n'apparaissent, pour la grande majorité d'entre eux, que dans une plage limitée du triangle de texture correspondant en gros aux classes limoneuse et limono-argileuse de la classification proposée par le GEPPA *.

La granulométrie des constituants non calcaires (obtenue après décarbonatation des matériaux) est très différente. A un très petit nombre d'exception près, elle s'étire dans la gamme des textures argileuses (des argiles limoneuses aux argiles lourdes) et peut être en outre caractérisée par la faiblesse des taux de sables fins et grossiers.

Enfin, les particules calcaires dont la granulométrie a été obtenue par référence aux deux précédentes apparaissent fortement limoneuses et présentent des taux relatifs de calcaire inférieur à 2 μ variant de 0 à près de 30 p. 100.

Ce diagramme fait en outre clairement apparaître le problème, évoqué en introduction, de la granulométrie des sols calcaires dont l'interprétation devra tenir compte de propriétés liées aux interactions dimension-nature minéralogique.

---

* GEPPA : Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée.

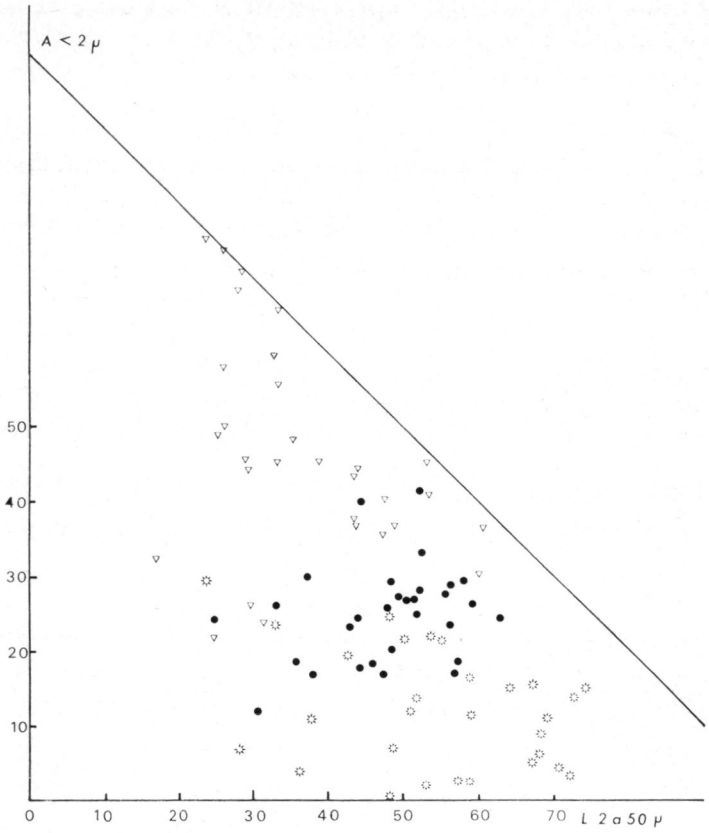


FIG. 1. — *Constitution des sols - Soils constitution*

● { Granulométrie du matériau non décarbonaté.
Particles size of natural samples.

▽ { Granulométrie de la fraction non calcaire.
Particles size of decarbonated samples.

✡ { Granulométrie de la fraction calcaire.
Particles size of calcareous particles.

II. — Méthodologie : analyse granulométrique et dosage de la matière organique

Après destruction des matières organiques à l'eau oxygénée 20 volumes, les échantillons (10 g de terre) ont été traités par une solution 0,1 N de KCl, lavés par centrifugation puis dispersés en présence d'hexamétaphosphate de sodium.

La séparation a été assurée par sédimentométrie à la pipette de Robinson pour les particules d'un diamètre équivalent ou inférieur à 20 μ et par tamisage pour les particules plus grossières.

Ce même traitement a été appliqué aux échantillons non prétraités et aux échantillons préalablement soumis à une décarbonation complète.

Dans les deux cas, les résultats sont rapportés à la terre totale séchée à 105° non décarbonatée. Les taux des différentes fractions granulométriques (A, Lf, Lg, Sf, Sg) portent en indice la lettre « G », dans le cas de la granulométrie effectuée sur la terre totale, qui est une granulométrie globale, et la lettre « v » pour les résultats obtenus après décarbonatation : c'est-à-dire pour les particules individualisées au vrai sens du terme.

Nous avons établi la répartition granulométrique du calcaire par différence entre les taux obtenus pour chaque fraction avec et sans décarbonatation préalable ($CaCO_3 < 2\mu$ p. 100 $= A_G$ — Av, par exemple).

Cette méthode est théoriquement critiquable (Dupuis, 1975). L'analyse granulométrique sans décarbonatation préalable peut en effet isoler des particules complexes constituées par un assemblage de particules plus fines (calcite, quartz, phyllite...) agrégées de façon stable par un ciment calcaire.

Lors de la décarbonatation, ces particules sont libérées en particules élémentaires. Lorsque de telles particules complexes existent, il peut y avoir sous estimation de la teneur en carbonates des fractions fines et, au contraire, surestimation de cette teneur dans toutes les classes granulométriques où figuraient initialement des particules complexes à constituants élémentaires non calcaires.

Pour éviter de telles erreurs, la meilleure méthode consiste à doser directement le calcaire (par titrimétrie ou conductimétrie du CO_2 issu de la décarbonatation) sur chaque fraction préalablement préparée en quantité suffisante. Une telle méthode est laborieuse et non dépourvue de risques d'erreurs analytiques.

Aussi, nous sommes-nous bornés à vérifier que la méthode d'évaluation par différence, comparée au dosage direct sur fraction, pratiqué à titre d'essai sur quelques échantillons (tabl. 1), n'entraînait pas de distorsion sensible (« Bouchot » de Charente — 1re ligne — et Paluds de Vaucluse).

TABLEAU 1

Quelques teneurs en carbonate de calcium des différentes classes granulométriques : comparaison de deux méthodes d'obtention.

Amounts of calcium carbonate in the separated fractions : comparison between two obtention methods

$CaCO_3 < 2\mu$ % par		$CaCO_3$ 2-20 μ par		$CaCO_3$ 20-50 μ par		$CaCO_3$ 50-200 μ par		$CaCO_3$ 200 μ-2 mm par		$CaCO_3$ total par	
Différence	Dosage direct	Différence	Dosage direct	Différence	Dosage direct	Différence	Dosage direct	Différence	Dosage direct	Σ Différence	Σ Dosage
24	15,6	21,6	23	13,1	14	12,8	13,8	24,2	24,5	95,7	90,9
17,4	13	32,4	33,5	17,2	18,1	13,8	13,1	10,5	12,5	91,3	90,2
6,8	5	15,5	20	7,5	7,1	3,3	3,4	2,3	2,9	35,4	38,4
12,3	12	28,8	28	15,9	16,2	13,9	15,3	13,9	15,9	84,8	87,4
13,3	11,8	31,3	28,3	14,4	14,1	12,8	15,3	13,2	14,6	85	84,1
7,3	7,5	18	19,3	18,1	18,3	9,1	9,4	2,4	4,1	54,9	58,6
12,1	11,2	15,2	17,5	14	14,7	6,3	8,4	1,7	2,8	49,3	54,6
6,4	6,3	3,9	6,3	4,7	9	5,2	8,4	18	19,7	38,2	49,7

Par ailleurs, des diagrammes RX sur les fractions limoneuses et sableuses décarbonatées des quelques sols de Paluds révèlent l'absence de phyllite dans ces assemblages.

A côté de ce problème, subsiste celui posé par la dispersion, préalable à la granulométrie, des matériaux non décarbonatés, notamment lorsqu'elle a été réalisée à l'hexamétaphosphate de sodium.

Différents auteurs (Mehrotra et Dhar, 1949 ; Tyner, 1940) se sont efforcés d'analyser les conséquences des réactions entre l'hexamétaphosphate et le carbonate de calcium sur les résultats de l'analyse granulométrique. Globalement, il ressort de ces travaux que le risque prédominant est celui d'une légère surestimation des fractions fines. En conséquence, on doit considérer que, dans les matériaux calcaires, la notion de particule élémentaire n'a fréquemment qu'une valeur relative. L'analyse granulométrique prend alors la signification d'un test permettant des comparaisons dont le caractère approximatif doit rester présent à l'esprit.

Les matières organiques libres et liées sont dosées par détermination du pouvoir réducteur du sol selon la méthode de Anne (1945), la présence de carbonate de calcium rendant en effet imprécises les méthodes par combustion (emploi du carmhographe par exemple).

III. — Caractéristiques de constitution

L'analyse granulométrique sans décarbonatation ne fournit pas directement de données intéressantes. Il est cependant curieux de constater que les résultats de Banin et Amiel (1970) sur sols d'Israël, de Gheyi, Frankart et Van Bladel (1974) sur sols du Maroc et nos propres résultats montrent qu'il existe une corrélation linéaire négative assez étroite entre taux d'argile $< 2\ \mu$ et taux de sables 2 μ à 2 mm, et que le coefficient de proportionnalité est dans les 3 cas très voisin de — 1. Ainsi la présence des limons fins (Lf_G) en quantité sensiblement identique dans les sols calcaires pourrait être un phénomène général.

Par ailleurs, les données de l'analyse granulométrique après décarbonatation permettent de trouver une corrélation négative satisfaisante entre les limons fins (2 μ à 20 μ) vrais Lf_v et le calcaire total de l'échantillon. Ce dernier résultat nous incite à rechercher en fonction du calcaire total des indications de la part des teneurs « calcaires » obtenus par différences (A_G — A_v), (Lf_G — L_v) etc... ; pour cela, non seulement la répartition granulométrique du carbonate de calcium est intéressante mais aussi les teneurs en carbonate de calcium des différentes fractions granulométriques, à savoir :

$$\frac{CaCO_3 < 2\ \mu}{A_G}, \quad \frac{CaCO_3\ 2\text{-}20\ \mu}{Lf_G} \ldots$$

Mais l'important, à partir des résultats de calculs statistiques effectués, est de savoir quels sont les paramètres de constitution indépendants. Sur les trente échantillons de notre collection, nous avons trouvé que les variables dépendant assez étroitement du calcaire total sont d'une part, $CaCO_3 < 2\ \mu$ ($r = 0{,}8$) et d'autre part,

$$\frac{CaCO_3 < 2\ \mu}{A_G}\ (r = 0{,}815),\ \frac{CaCO_3\ 2\text{-}20\ \mu}{Lf_G}\ (r = 0{,}812) \quad \text{et} \quad \frac{CaCO_3\ 20\ \mu\text{-}2\ mm}{S\ 20\ \mu\text{-}2\ mm}\ (0{,}9)\ .$$

Dans la suite de ce travail, nous éviterons donc de faire intervenir simultanément ces 4 paramètres et le calcaire total. Par ailleurs, les coefficients de proportionnalité

relatifs à $\frac{CaCO_3 < 2\,\mu}{A_G}$ (1,37) et $\frac{CaCO_3\ 20\ \mu\text{-}2\ mm}{S_G}$ (0,77) montrent que c'est le taux de calcaire fin dans l'argile granulométrique qui admet la plus large gamme de variations. Ce constituant calcaire fin apparaît d'ores et déjà devant jouer un rôle particulier dans notre étude.

L'importance du paramètre calcaire fin est mise aussi en évidence lorsque nous voulons interpréter la MO d'un sol contenant du calcaire en terme de comportement. Habituellement, pour tenir compte de l'interaction existant au niveau colloide d'un sol entre MO et argile au cours de la formation des complexes argilo-humiques, les auteurs (Kheyrabi et Monnier, 1968) considèrent le rapport $\frac{MO}{argile}$. Dans le cas de la collection étudiée, en éliminant toutefois les échantillons de Vitrolles qui, étant des sous-sols, doivent posséder une MO peu mobile, c'est seulement entre $\frac{MO}{A_V}$ et $CaCO_3 < 2\,\mu$ que nous obtenons la meilleure corrélation ($r = 0{,}91$) (fig. 2).

$$\frac{MO}{A_V} \times 100 = 1{,}9\ CaCO_3(< 2\,\mu) + 6{,}2\ .$$

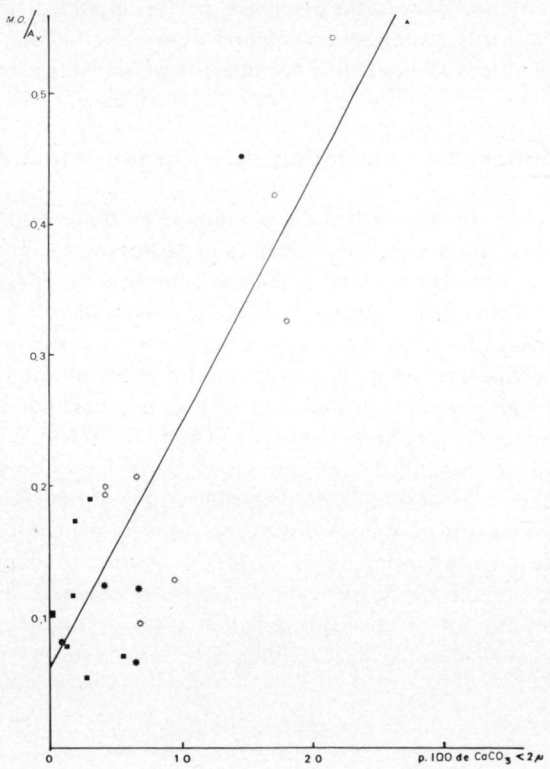


FIG. 2.* — *Relation* $\frac{MO}{Av}$ *et calcaire fin.*

Relationship between $\frac{\text{organic matter}}{\text{non calcareous clay}}$ *and* $CaCO_3 < 2\,\mu$ *content*

* (Dans toutes les figures, les sols d'une même région sont représentés par le même signe) (In all the figures, the soils of the same country are represented by the same sign).

Nous remarquons qu'à teneur en phyllite constante, la teneur en matières organiques croît avec celle du calcaire fin. Ce résultat est à rapprocher de celui obtenu par Chouliaras (1976) sur des rendzines.

En effet, il montre qu'une part très importante du carbone lié est bloquée par du carbonate. Sous l'action du CO_2 dégagé lors de la biodégradation de la MO du milieu, il y a attaque du $CaCO_3$ présent et formation d'ions Ca^{++} et HCO_3^- qui peuvent conduire à des mécanismes aboutissant à une redistribution du $CaCO_3$. D'après Chouliaras, il peut y avoir simultanément action chimique avec saturation des sites libres de la MO en voie de biodégradation et action mécanique avec enrobage cristallin de $CaCO_3$ autour de la MO accessible aux micro-organismes.

Cet effet protecteur se retrouve dans le fait qu'en sol calcaire une augmentation de la teneur en matières organiques ne modifie que très peu la mouillabilité qui, par contre, se trouve diminuée en sol non calcaire. Nous avons d'ailleurs effectué des déterminations de stabilité structurale sur quelques-uns des échantillons calcaires et n'avons trouvé aucune relation entre le taux d'agrégats stables au benzène dont dépend la mouillabilité, et le taux de MO.

Les résultats obtenus dans cette première partie apportent quelques précisions sur la constitution des sols contenant du calcaire et essentiellement sur la fraction fine qui apparaît comme étant la meilleure caractéristique constitutive de l'effet calcaire.

IV. — Propriétés en relation avec l'organisation des sols

Les propriétés des sols dépendent en grande partie de la distribution dimensionnelle des particules constituantes. Cependant la prévision de ces propriétés est difficile sur la seule base des données granulométriques : il existe un effet de texture dû aux interactions entre constituants. Il peut y avoir de « vrais » grains grossiers formant le squelette, mais parfois, des éléments colloïdaux, par effet d'enrobage et de cimentation d'éléments plus fins que les sables, conduisent à la formation d'éléments de taille comparable à celle des « vrais » grains grossiers. D'ailleurs, nous avons déjà parlé (p. 5) des conséquences de ces phénomènes sur la granulométrie. Divers états résultent de la nature, de la proportion de ces ciments et de la façon dont ils se placent : à chaque état correspond un ensemble de propriétés spécifiques. Parmi ces dernières, et pour la collection de sols dont nous disposons, nous avons choisi d'étudier la capacité d'échange (liée à un phénomène de surface), l'humidité équivalente (liée à la distribution dimensionnelle de la porosité du sol), la porosité d'agrégats naturels (partie de la porosité totale du sol), fonction de l'arrangement des particules élémentaires entre elles et enfin, la sensibilité au compactage.

1. — *Capacité d'échange*

Les valeurs de la capacité d'échange en cations exprimant la réactivité des sols sont très étroitement reliées à la teneur en phyllite et absolument pas à la teneur en argile granulométrique.

$$CE \text{ meq/100 g} = 1{,}69 + 0{,}57\ A_v \qquad r = 0{,}95 \qquad (1)$$

Puisque les propriétés physico-chimiques des colloïdes humiques présentent

quelques analogies avec celles des colloïdes argileux, nous avons tenté, comme l'a fait Osty (1971), d'introduire le taux de matière organique :

$$CE = 1{,}21\ MO + 0{,}51\ A_v - 1{,}51 \qquad r = 0{,}98 \qquad (2)$$

En éliminant les échantillons provenant de Vitrolles pour les raisons évoquées au chapitre III, nous obtenons :

$$CE = 1{,}58 + 0{,}51\ A_v \qquad r = 0{,}93 \text{ (fig. 3)} \qquad (3)$$

et

$$CE = 1{,}083\ MO + 0{,}51\ A_v - 1{,}077 \qquad r = 0{,}98 \qquad (4)$$

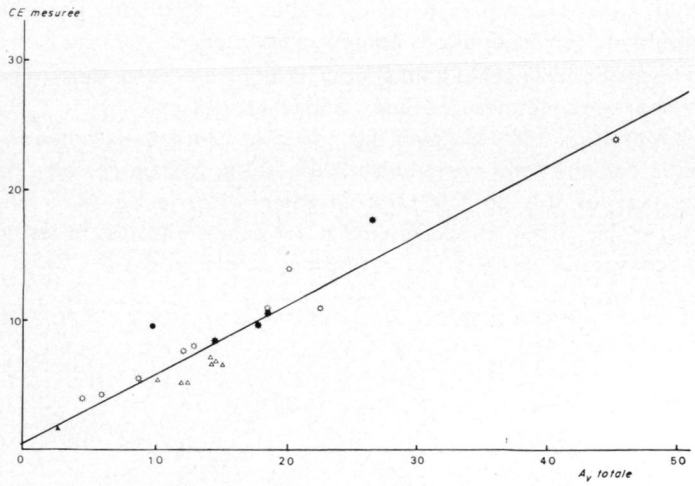


FIG. 3. — *Relation capacité d'échange et teneur en phyllite.*
Relationship between cation exchange capacity and noncalcareous clay content.

Dans les deux cas, l'introduction du facteur matière organique améliore la corrélation linéaire. Or, au chapitre III, nous avons été amenés à conclure qu'une partie de la matière organique pouvait être protégée par du carbonate de calcium fin. Cet effet protecteur peut alors être exprimé par le rapport $\frac{MO}{CaCO_3 < 2\,\mu}$ (pour les sols contenant du calcaire dans la fraction fine). On trouve :

$$CE = 1{,}22 + 0{,}39\ A_v + 3{,}54\ \frac{MO}{CaCO_3 < 2\,\mu} \qquad (2\ bis)$$

pour l'ensemble des échantillons et

$$CE = 1{,}64 + 0{,}43\ A_v + 2{,}7\ \frac{MO}{CaCO_3 < 2\,\mu} \qquad (4\ bis)$$

pour les sols exceptés ceux provenant de Vitrolles.

Cette relation est plus satisfaisante que la précédente quant au signe et à la valeur du terme constant ; en outre, elle exprime que la capacité d'échange est d'autant

plus faible que le taux de calcaire fin est élevé. Cette constatation met encore l'accent sur l'action du $CaCO_3$ fin sur la matière organique : en effet, par réaction chimique, les sites libres de la MO peuvent être saturés par $CaCO_3$.

2. — *Humidité équivalente*

Nous comparons les valeurs des humidités équivalentes mesurées et calculées d'après la relation de Gras (1957) :

$$He = 0{,}59\ A_G + 0{,}16\ Lf_G + 5{,}47 \qquad (He > 20 \text{ p. } 100)$$
$$He = 0{,}51\ A_G + 0{,}14\ Lf_G + 7{,}35 \qquad (He < 20 \text{ p. } 100)$$

dans lesquelles A_G et Lf_G représentent les argiles et les limons fins obtenus par la granulométrie, donc sur échantillons non décarbonatés.

Hormis le cas de trois échantillons, pour lesquels l'accord He_{mes}-He_{cal} est satisfaisant, les valeurs des He mesurées sont différentes des valeurs He_{cal} avec un écart relatif d'au moins 10 p. 100 ; on peut distinguer en outre deux catégories : les sols dont le taux de calcaire total varie entre 70 et 100 p. 100 de calcaire pour lesquels $He_{mes} > He_{cal}$ et les sols dont le taux de calcaire varie de 34 à 70 p. 100 pour lesquels $He_{mes} < He_{cal}$ (fig. 4). Cependant ni les écarts absolus, ni les écarts relatifs ne sont significativement reliés à l'un des termes « calcaires ».

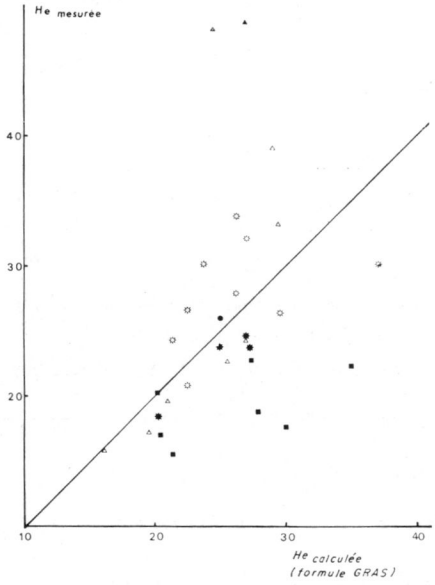


FIG. 4. — *Humidité équivalente mesurée et calculée* (d'après Gras).
Mesured and calculated (Gras) *water capacity.*

Une corrélation double du même type que l'équation de Gras, s'est avérée non significative sur ces résultats expérimentaux, que l'on prenne en compte les teneurs granulométriques A_G et Lf_G ou les teneurs vraies (Av et Lf_v). Dans ces conditions,

pour expliquer les valeurs de He mesurée nous ne disposons plus que des teneurs en carbonates : $CaCO_3(< 2\ \mu)$ et $CaCO_3$ squelette ; puisque la première variable apparaît comme jouer un rôle primordial tant dans les relations de constitution (chapitre III) que dans la détermination de la CE, nous avons testé l'influence de ce paramètre sur les valeurs de He et avons obtenu :

$$He = 17{,}71 + 0{,}96\ CaCO_3(< 2\ \mu) \qquad r = 0{,}83 \qquad \text{(fig. 5)}. \qquad (5)$$

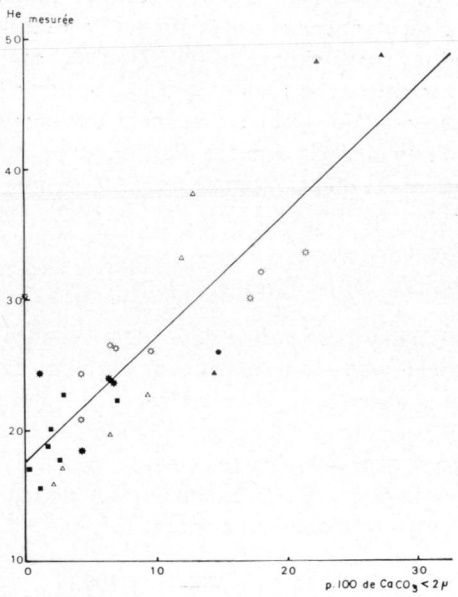


FIG. 5. — *Relation humidité équivalente et calcaire fin.*
Relationship between water capacity and $CaCO_3 < 2\ \mu$ *content.*

Néanmoins, il était peu probable que l'humidité ne soit reliée qu'à ce seul paramètre, le modèle de Gras faisant toujours intervenir deux classes granulométriques ; aussi avons-nous introduit une deuxième variable : $CaCO_3$ 2 µ à 20 µ. Nous obtenons alors :

$$He = 13{,}78 + 0{,}93\ CaCO_3(< 2\ \mu) + 0{,}17\ CaCO_3(2\ \mu\text{-}20\ \mu) \qquad r = 0{,}84 \qquad (6)$$

relation dans laquelle le coefficient affectant la variable $CaCO_3(2\ \mu\text{-}20\ \mu)$ est semblable à celui des limons fins trouvé par Gras.

Puisque l'argile et les limons granulométriques ne fournissent pas d'explication à l'humidité équivalente et que, par contre, le calcaire fin joue un rôle appréciable, nous avons voulu distinguer l'éventuel effet de la phyllite seule de celui du calcaire fin. Nous avons trouvé dans ces conditions, que la phyllite avait une tendance ($r = 0{,}71$) à une influence négative sur l'humidité équivalente, le calcaire fin ayant un effet positif :

$$He = 10{,}8 - 0{,}29\ A_V + 0{,}47\ (CaCO_3(< 2\ \mu) + Lf_G)\ . \qquad (7)$$

On trouve aussi cet effet de la phyllite dans l'équation :

$$He = 22{,}07 + 3{,}02 \frac{CaCO_3(< 2\ \mu)}{A_v} \qquad (r = 0{,}81) \qquad (8)$$

Ces deux équations (7 et 8) nous amènent à poser la question : que se passe-t-il donc à l'intérieur de l'assemblage $CaCO_3(< 2\ \mu)$-phyllite ? puisque la phyllite semble avoir un effet surprenant, parce que dépressif, sur la valeur de l'humidité équivalente.

Des observations au microscope électronique sur lames minces de la phase argile granulométrique seraient certainement riches en renseignements.

Néanmoins, parmi les corrélations (5), (6), (7) et (8), somme toute satisfaisantes toutes les quatre, nous choisirons la relation (6) pour estimer la valeur de l'humidité équivalente d'un sol contenant du calcaire ; en effet, cette corrélation présente l'avantage de montrer que l'humidité est une fonction additive de la partie calcaire des fractions granulométriques et non pas, comme pour un sol non calcaire, une propriété additive des classes granulométriques.

3. — *Porosité texturale*

Les échanges d'eau, d'air et de chaleur dépendent des caractéristiques de l'espace poral, lesquelles résultent, outre de l'activité biologique, des relations complexes entre constituants granulométriques, génératrices d'un effet texture. Comme nous venons de montrer que la capacité d'échange et l'humidité équivalente sont affectées par la présence du calcaire dans les sols, il se peut qu'il en soit de même pour la porosité texturale. Par définition, la porosité représente le pourcentage des vides par rapport au volume encombré, ce qui se traduit à l'aide des densités par :

$$P = \left(1 - \frac{d_{app}}{d_{solide}}\right) \times 100.$$

Les mesures de densité apparente sur agrégats de 2 à 3 mm par la méthode au pétrole (Monnier, Stengel et Fiès, 1973) sont comprises entre 1 et 1,9 pour des valeurs de densité de solide se situant entre 2,55 et 2,72, ce qui aboutit à des porosités souvent élevées. Les densités de solides sont du même ordre de grandeur que celles des sols calcaires ; par contre, les densités apparentes d'agrégats de sols calcaires sont très significativement plus faibles que celles d'agrégats de sols non calcaires bien qu'ils possèdent des teneurs en argile granulométrique identiques ; il en résulte alors une porosité significativement plus élevée pour les sols calcaires. Puisque la porosité texturale résulte de l'arrangement des constituants du sol entre eux selon leur taille et leur nature et que cet arrangement est lui-même fonction de la granulométrie, de l'histoire pédologique, hydrique et mécanique, deux hypothèses peuvent être avancées pour tenter d'expliquer cette porosité élevée.

— l'arrangement des phyllites est modifié par la présence de $CaCO_3$ fin à l'intérieur de la phase « argile »,

— l'arrangement même des phyllites par rapport au squelette est modifié.

Pour tester la validité de l'une ou l'autre de ces hypothèses, il fallait analyser la porosité d'agrégats naturels de ces sols et pour cela, la comparer à la porosité texturale qu'ils présentent après qu'ils aient subi une histoire hydrique standard (Khey-

rabi et Monnier, 1968) n'entraînant pas de remaniements des carbonates et conduisant à un certain arrangement de la phase « argile » par rapport aux grains du squelette. Ainsi, nous avons mesuré la densité apparente γ_d d'agrégats de même taille que les agrégats naturels, mais obtenus à partir de « gâteaux » organisés selon la méthode préconisée par Kheyrabi (1968).

Statistiquement, la corrélation $\gamma_{d\ nat}$ $\gamma_{d\ gâteau}$ est bonne

$(r = 0{,}94)$ (fig. 6) avec $\gamma_{d\ nat} = 0{,}161 + 0{,}861\ \gamma_{d\ gât}$

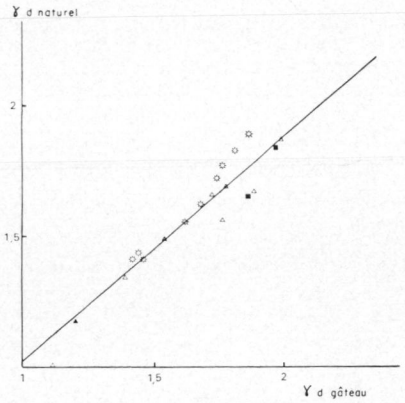


FIG. 6. — *Comparaison des densités apparentes d'agrégats naturels et d'agrégats obtenus à partir des « gâteaux » Kheyrabi.*

Comparison between bulk density obtained from particles aggregated in situ or like Kheyrabi method.

les densités d'agrégats naturels n'étant supérieures que de 2 à 5 p. 100 environ aux densités de gâteaux. Nous avons donc simulé au laboratoire un système ayant une existence dans le milieu naturel calcaire ; ce qui laisse supposer que les valeurs faibles des densités apparentes sont en relation avec un assemblage particulier des particules les plus fines, c'est-à-dire de la phase argile-calcite. Cet arrangement plus lâche des particules (entraînant un foisonnement du système) est peut être dû à des phénomènes de dissolution, de recristallisation et de redistribution (même sans mouvement) qui se produisent dans le sol sous l'effet de variations de température et/ou de pression partielle de CO_2. Ces divers phénomènes peuvent ainsi être à l'origine de nouvelles lacunes ou de ponts conduisant à un foisonnement du volume.

Les conséquences de ces divers phénomènes sont mises en évidence par des corrélations linéaires négatives entre $\gamma_{d\ nat}$ et les taux de calcaire total d'une part, et de calcaire fin d'autre part (fig. 7 et 8).

$$\gamma_{d\ nat} = 2{,}333 - 0{,}0111\ CaCO_3 \text{ total}$$
$$\gamma_{d\ nat} = 1{,}827 - 0{,}0246\ CaCO_3(< 2\ \mu)\ .$$

La relation $\gamma_{d\ nat}$ $CaCO_3(< 2\ \mu)$ est la plus satisfaisante car elle donne pour un sol sans calcaire dans la fraction fine, une valeur acceptable de la densité apparente pour une granulométrie comparable (1,827). Cette relation quantifie le rôle foisonnant du calcaire fin : la densité apparente d'un agrégat étant plus faible, sa porosité texturale est évidemment plus élevée.

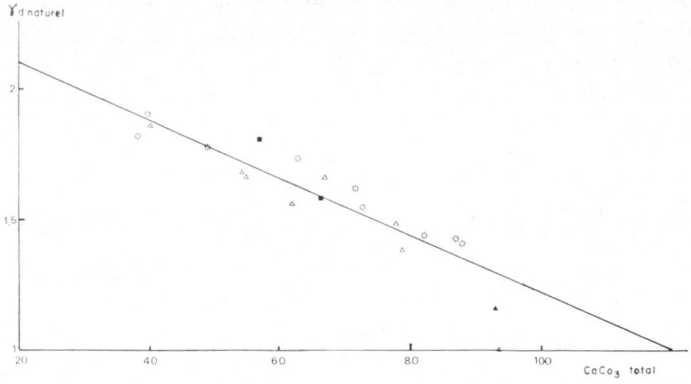


FIG. 7. — *Relation densité apparente d'agrégats naturels et teneur en* $CaCO_3$ *total.*
Relationship between bulk density of aggregats in situ *and total calcium cabonate content.*

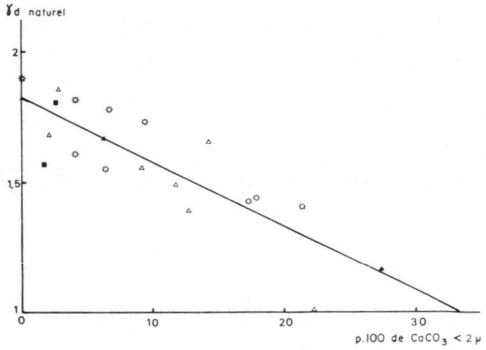


FIG. 8. — *Relation densité apparente d'agrégats naturels et teneur en* $CaCO_3$ *fin.*
Relationship between bulk density of aggregats in situ *and* $CaCO_3 < 2\ \mu$ *content.*

4. — *Sensibilité au compactage*

Les assemblages élémentaires dans lesquels la disposition relative des particules est responsable de la porosité, peuvent subir, sous l'influence de facteurs mécaniques, des modifications plus ou moins marquées selon leur texture.

Pour un sol donné, la sensibilité au compactage dépend essentiellement de sa constitution physique et de la teneur en eau à laquelle il est compacté. Des études faites par Faure en sols non calcaires (1971-1974) ont montré que la sensibilité n'est pas un phénomène textural mais un phénomène dépendant seulement de l'état dans lequel se trouve le constituant argile seul.

Nous avons déterminé, en fonction de la teneur en eau, les variations de densité apparente de quatorze échantillons de la collection, compactés selon la méthode Proctor. Tout comme dans le cas des sols non calcaires, la courbe densité-teneur en eau présente un point singulier au delà duquel la densité est fonction croissante de la teneur

en eau jusqu'à atteindre une valeur maximale. Soit Wc la teneur en eau de ce point singulier ; d'après Faure, des sols de granulométries variées et de provenances naturelles diverses, tout comme des milieux modèles (argile-sable) ne sont pas sensibles aux effets du compactage tant que l'argile qu'ils contiennent n'a pas atteint le seuil de teneur en eau défini par $\frac{Wc}{A} = Cte$. Cette constante est de l'ordre de 35 p. 100 pour les sols naturels, 32 p. 100 pour des mélanges kaolinite-sable et 38 p. 100 pour des milieux montmorillonite-sable. Toujours sur des sols naturels parmi lesquels les échantillons précédemment traités, Faure et Guérif ont trouvé que l'introduction du taux de MO conduisait à une très bonne corrélation :

$$\left(\frac{Wc}{A}\right) \text{ p. } 100 = 1{,}74 \frac{MO}{A} \text{ p. } 100 + 23{,}57 .$$

Sur les échantillons calcaires qui nous intéressent, nous constatons que les rapports $\frac{Wc}{A_G}$ et $\frac{Wc}{A_v}$ ne sont pas constants, qu'ils sont toujours supérieurs aux valeurs de $\frac{Wc}{A}$ calculés à l'aide de la régression précédente, mais que cet excès se trouve expliqué avec une très bonne corrélation ($r = 0{,}985$) par le rapport $\frac{CaCO_3 (< 2\,\mu)}{A_v}$ (en p. 100) c'est-à-dire :

$$\left(\frac{Wc}{A_v}\right) \text{ p. } 100 = 1{,}74 \left(\frac{MO}{A_v}\right) \text{ p. } 100 + 0{,}78 \left(\frac{CaCO_3 (< 2\,\mu)}{A_v}\right) \text{ p. } 100 + 35{,}24 \quad \text{(fig. 9).}$$

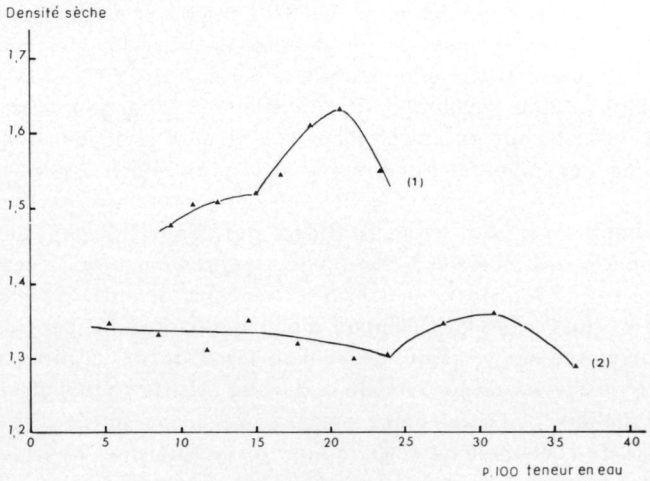


FIG. 9. — *Courbes de compactage.*

Compaction curves.

(1) $\frac{CaCO_3 < 2\,\mu}{Av}$ p. 100 = 30,1

(2) $\frac{CaCO_3 < 2\,\mu}{Av}$ p. 100 = 1 050.

Il ressort de cette équation qu'un sol sans MO et sans calcaire fin présente un $\frac{Wc}{A_v}$ de 35, valeur non significativement différente de celle trouvée par Faure. De plus, puisque nous avons vu au chapitre III que le rapport $\frac{MO}{A_v}$ augmente avec la teneur en calcaire fin, la teneur en eau au point singulier sera toujours une fonction croissante de cette teneur en calcaire fin.

Par ailleurs, puisque les rapports (exprimés en p. 100) $\frac{CaCO_3\ (< 2\ \mu)}{A_v}$ sont, à l'exception de 2, tous supérieurs d'au-moins deux fois (et jusqu'à vingt fois) aux rapports $\frac{MO}{A_v}$, le terme correctif $0{,}78\ \frac{CaCO_3\ (< 2\ \mu)}{A_v}$ sera toujours plus important que le terme $1{,}74\ \frac{MO}{A_v}$; ainsi ressort encore une fois l'influence prépondérante de la constitution de la fraction fine d'un sol calcaire.

Conclusion

Ce travail réalisé sur les propriétés des sols calcaires a montré que la grandeur caractéristique de ces sols est la teneur en carbonate de calcium fin (exprimé en p. 100 de terre). En effet, dès l'examen de leur constitution, nous avons remarqué que la teneur en carbonate de calcium fin de la fraction argile, pour des taux de calcaire total compris entre 34 et 93 p. 100, présentait une plage de variations plus importante que la teneur en calcaire du squelette. De plus, en considérant le paramètre matière organique, nous avons trouvé que la présence de calcaire fin était responsable d'une part de sa valeur généralement élevé et d'autre part de son influence très affaiblie sur la stabilité structurale. Cet effet protecteur du calcaire fin sur la matière organique apparaît aussi dans l'évaluation de la capacité d'échange qui est diminuée par augmentation de la teneur en calcaire fin ; ce résultat prouvant que les échanges d'ions au niveau des colloïdes humiques sont rendus difficiles par la présence du carbonate.

Dans le chapitre IV, nous avons considéré des propriétés physiques en relation avec l'organisation des matériaux constitutifs des sols calcaires. C'est ainsi que la circulation de l'eau et son stockage sont déterminés en grande partie par l'architecture du sol : les possibilités de rétention d'eau d'un sol dépendent de sa porosité, c'est-à-dire du volume des vides qui peuvent varier en forme et répartition. Puisque, on l'a constaté au niveau de la porosité texturale, c'est le carbonate de calcium fin qui régit essentiellement l'assemblage élémentaire, il est satisfaisant de mettre en évidence le rôle du carbonate de calcium dans les mécanismes hydriques et, en particulier, dans les déterminations de l'humidité équivalente. Dans ces conditions, il est normal que les régressions de Gras (1957) basées uniquement sur la texture du sol ne donnent pas de valeurs correctes de l'humidité équivalente. On sait aussi que les assemblages élémentaires peuvent subir des modifications sous l'action de facteurs mécaniques et, dans le cas des échantillons calcaires, nous avons mis l'accent sur l'importance du terme $\frac{CaCO_3\ (< 2\ \mu)}{A_v}$ sur la teneur en eau de la phyllite à son état

d'entrée en plasticité : en effet, cette teneur en eau est considérablement augmentée par la présence de calcaire fin.

Tous ces résultats obtenus au niveau soit constitution, soit organisation des sols contenant du carbonate de calcium, nous amènent à conclure qu'un sol pourra être qualifié de « calcaire » s'il contient du carbonate de calcium dans la fraction fine (inférieure à 2 μ), ce carbonate fin étant, dans la majorité des cas, responsable des propriétés particulières de ces sols.

Reçu pour publication en novembre 1978.

Summary

First contribution to the study of the specific physical and mechanical characteristics of calcareous soils.

The extent of the calcareous soils on the periphery of the Mediterranean sea and more precisely at the regional level, their high specificity (from an agronomical point of view as well as from a physico-chemical and physical one) and the deficient knowledge of their characteristics gave rise to this study.

We considered a collection of calcareous soils of various origins and studied their composition characteristics and some of their properties linked with their organization : exchange capacity, moisture equivalent, texture porosity and compaction susceptibility.

At the level of the composition the agreement between the size grade and the mineralogical composition cannot be chosen for basis as it is the case in the other soils : the $< 2\,\mu$ part in particular is no more comparable to the phyllite group as it cannot contain variable amounts of calcium carbonate. The results of the granulometric analyses with decarbonation or not and the interpretation of the interaction between organic matter and (phyllitous) clay lead to the conclusion that the fine calcium carbonate itself seems to be the best constitutive characteristic of the calcareous effect.

Among the properties we stated that the higher the fine calcium carbonate content is, the lower is the exchange capacity ; moreover a quite satisfactory approach of the value of the moisture equivalent is obtained with a relation taking the carbonated composition of the fine fraction into account. The porosity of a soil being responsible for its water retention capacity and the role of the fine calcium carbonate on the moisture equivalent being proved, it is not surprising to find that fine calcium carbonate seems also to rule the elementary structure : as a matter of fact porosity increases with fine calcium carbonate content. This structure may finally undergo modifications under the influence of mechanical factors : under these conditions the water content of phyllite at the singular point in the curve representing the compaction susceptibility appears to be also a function of the fine calcium carbonate content.

Zusammenfassung

Erster Beitrag zur Untersuchung der den Kalkboden eigenen Physikalischen und mechanischen Eigenschaften.

Wir haben eine Sammlung von Kalkböden verschiedener Herkunft betrachtet und haben ihre Aufbaumerkmale und einige ihrer mit ihrer Organisation verbundenen Eigenschaften : Umtauschkapazität, Feldkapazität, Texturporosität und Verdichtungsempfindlichkeit studiert. Die Ergebnisse der Korngrösseanalysen mit oder ohne Kohlensaüreentziehung und die Deutung der Zwischenwirkung der organischen Substanz mit Phyllit führen zu der Schlussfolgerung dass der Karbonat von feinen Kalzium das beste Aufbaumerkmal des Kalkeffekts zu sein scheint.

Was die Eigenschaften betrifft haben wir beobachtet dass die Umtauschkapazität mit der Zunahme von Feinkalk abnimmt ; der Wert der Feldkapazität kann mit einer den Kohlenstoffhaltigen Aufbau der Fraktion $< 2\,\mu$ betrachtenden Beziehung ausgedrückt sein und die Porosität wächst mit dem Gehalt an Feinkalk zu.

Unter dem Einfluss mechanischer Faktoren kann die Grundzusammenstellung Veränderungen ertragen und der Wassergehalt des Phyllits an dem sonderbarem Punkt der Kurve der Verdichtungsempfindlichkeit hängt auch von dem Gehalt an Feinkalk. Die Hauptrolle des Feinkalsiums ist so klargestellt.

РЕЗЮМЕ

Первая контрибуция к изучению физических и механических особенностей известковых почв.

СУТИ НИКОЛЬ

Рассматривалась коллекция известковых почв разного происхождения и изучались характерности их состава и некоторые свойства связанные с их организацией : емкость обмена, зквивалентная влажность, порозность структуры и чувствительность к уплотнению. Результаты гранулометрических анализов до и после декарбонатации и интерпретация междудействия органического вещества с филлитом, позволяют заключить что мелкий карбонат кальция является по всей вероятности лучщей составной характерностью известкового эффекта.

В отношении свойств, найдено, что емкость обмена уменьщается с увеличением содержания мелкого известняка ; величина эквивалентной влажности может быть выражена соотношением, принимающим во внимание карбонатный состав фракции $< 2\ \eta$; что-же касается порозности — она увеличивается с увеличением содржания мелкого известняка.

Под влиянием механмческих факторов, элементарная смесь может подвергнуться изменениям и содержание воды в филлите, в отдельном пункте кривой чувствительности к уплотнению будет зависеть также от содержания мелкого известняка. Таким образом выявляется существенная роль мелкого известняка.

Références bibliographiques

ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.*, **2,** 161-172.

BANIN A., AMIEL A., 1969-1970. A correlative study of the chemical and physical properties of a group of natural soils of Israel. *Geoderma*, **3,** 185-198.

CHIAVERINI J., 1976. *Recherches sur les sols calcaires des lavanderaies du Sud-Est de la France. Liaisons entre quelques paramètres physiques et chimiques*. Thèse Docteur de spécialité (Nice).

CHOULIARAS N., 1976. *Evolution de la matière organique dans une rendzine*. Thèse Docteur Ingénieur, Nancy I.

DUPUIS M., 1975. La répartition granulométrique des carbonates dans le sol. *Sci. Sol*, **4,** 249-270.

FAURE A., 1976. Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. *Sci. Sol*, **2,** 121-130.

FAURE A., GUÉRIF J. A paraître.

GHEYI H. R., FRANKART R., Van BLADEL R., 1974. Chemical and physical properties of some calcareous soils of Nkheila and Gharb regim (Morocco). *Pédologie*, XXIV, 199-215.

GRAS R., 1957. Relations entre l'humidité équivalente et la granulométrie du sol (Rapport non publié).

GUÉRIF J., 1974. Caractéristiques physiques et techniques des terroirs maraîchers du Vaucluse. *Mémoire fin d'études E. S. I. T. P. A.*, Paris.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

MARTY J. R., 1969. *Contribution à l'étude des Boulbènes*. Thèse Docteur Université, Paris.

MEHROTRA R. C., DHAR N. R., 1949. Preparations and properties of sodium hexametaphosphate and a study of the extent of complexe formation with calcium ions by conductivity data. *Proc. Nat. Ind. Sci. Inst.*, **16,** 59-69.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse Docteur Ingénieur, Paris.

MONNIER G., STENGEL P., FIÈS J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.*, **24** (5), 533-545.

OSTY P. L., 1971. Essai de quantification de l'aptitude à la fissuration de terres très argileuses par délitement dans l'alcool éthylique. Recherche du rôle de différents facteurs. *C. R. Acad. agric.*, **1,** 75-87.

PÉDRO G., 1972. Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. *Sci. Sol*, **1,** 5-18.

TYNER E. H., 1940. The use of sodium metaphosphate for dispersion of soils for mechanical analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **4,** 106-113.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 439-452.

Utilisation d'une relation simple entre le bac classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'ETP en zone soudano-sahélienne ([1]).

Ch. M. BALDY

avec la collaboration technique de F. NIKIEMA et M. YONI *

Station de Bioclimatologie
Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Des mesures d'évaporation sur bac A sont poursuivies de façon systématique sur huit stations météorologiques de Haute-Volta depuis 1968. Une estimation de l'ETP par la méthode de Penman a également été effectuée pour ce pays en utilisant les données de rayonnement et les durées d'insolation disponibles. L'étude de l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année montre que l'influence du déficit de saturation de l'air sur l'évaporation du bac est primordiale en région soudano-sahélienne. Elle se traduit par la relation simple suivante entre l'évaporation brute EA du bac classe A et l'ETP Penman :

$$\frac{EA}{ETP} = 2 - 1{,}25\ HR$$

où HR est l'humidité relative moyenne de l'air (entre 0 et 1).

Cette relation est utilisée pour estimer l'ETP en Haute-Volta à partir des mesures d'évaporation sur bac classe A.

I. — Introduction

La République de Haute-Volta est située dans la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, entre 10 et 15° N, et entre 5° W et 2° E ; elle jouxte au sud le Bénin, le Togo, le Ghana et la Côte d'Ivoire, à l'ouest et au nord le Mali, et à l'est le Niger. Son altitude moyenne est voisine de 300 m. La *pluviosité* varie de 1 400 mm au Sud-Ouest à 400 mm environ au NE, avec une seule saison de pluies : d'avril à octobre au Sud, et de juin à septembre au Nord, et une très grande *irrégularité* dans les répartitions interannuelles et mensuelles. Les *températures moyennes* sont élevées toute l'année : de 23 à 27 °C en janvier, de 28 à 34° en mai, et de 25 à 27° en août, avec

([1]) Travail effectué dans le cadre du Projet financé par le Programme des Nations Unies pour le Développement sous la direction technique de l'Organisation météorologique mondiale RAF 74/079 : Renforcement des services Agrométéorologiques et hydrologiques des Pays du Sahel.

* Direction de la Météorologie Nationale, B. P. 576, Ouagadougou, Haute-Volta.

une moyenne des maximums qui dépasse 41° en avril dans le nord (Dori). On verra plus loin l'évolution annuelle des principaux paramètres du climat (fig. 1*a*).

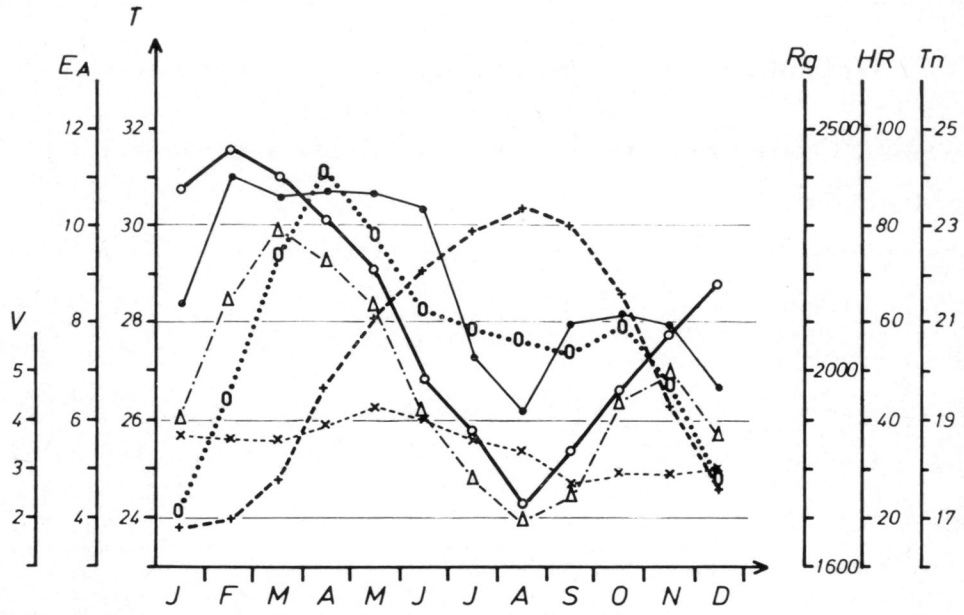


FIG. 1*a*. — *Paramètres climatiques à Bobo-Dioulasso.*
Climatic parameters for Bobo-Dioulasso.

×-----× V : Vent à 10 m en m s^{-1}.
Wind at 10 m height in m s^{-1}.
o——o EA : Evaporation du bac A en mm. jour.
Pan A evaporation in mm. day.
+-----+ HR : Humidité relative moyenne en p. cent
Monthly mean relative humidity, p. 100 (mean of 8 observations).
●——● Rg : Rayonnement global en J. cm^{-2}/jour
Global radiation J. cm^{-2}/day.
△-·-·-·-△ T : Température moyenne sous abri en °C.
Monthly mean temperature under screen °C.
o·····o T_n : Température minimale sous abri en °C.
Monthly mean minimum temperature under screen °C.

Les problèmes d'évaporation des nappes d'eau libre, de bilan hydrique des cultures et de conservation de l'eau ont donc une extrême importance sous un tel climat.

Trois méthodes d'estimation de l'évaporation sont utilisées en Haute-Volta : l'évaporomètre de Piche sous abri anglais, le bac d'évaporation enterré type Colorado (modifié ORSTOM), en hydrologie, et le bac au-dessus du sol type A, implanté selon les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM 83), à des fins de comparaisons internationales. Une comparaison systématique de ces trois types d'appareils reste à faire, mais il paraît difficile d'utiliser les données de l'évaporomètre de Piche, en raison de la mauvaise homogénéité de son installation sous l'abri. Quant aux mesures d'évaporation de bacs d'eau libre, leur signification exacte reste à établir.

L'estimation de l'ETP à partir de formules climatiques a été étudiée par un grand nombre d'auteurs, et de nombreuses méthodes ont été proposées. La méthode la plus satisfaisante sur le plan physique serait d'effectuer des mesures systématiques de bilan d'énergie et de rayonnement, comme Itier et Perrier (1976) l'ont montré récemment. Pouyaud (comm. pers.) sur le lac de Bam, en Haute-Volta, et Perrier et Combres (comm. pers.) en Côte-d'Ivoire ont effectué des campagnes de mesure, le premier dans un but hydrologique, les seconds, sur diverses cultures, et notamment *Ananas comosus L.*

Malgré quelques inconvénients (complexité des calculs, précision moindre hors des climats tempérés ...), la formule de Penman, utilisée par de nombreux chercheurs en zone tropicale, paraît convenir (FAO, 24, 1976 ; Rijks, 1976 ; Riou, 1975 ; Seguin, 1975 ; etc...).

C'est pourquoi, pour fournir aux services de l'agriculture une information sur l'évapotranspiration potentielle régionale en Haute-Volta, et définir les besoins en eau des cultures irriguées, et le cycle végétatif des cultures pluviales, une étude de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Penman a été faite (Ouedraogo et Baldy, 1976).

Le but poursuivi ici est de proposer une méthode plus simple que le calcul de Penman, permettant d'estimer l'évapotranspiration potentielle régionale à partir d'une mesure de l'évaporation et des données de l'abri météorologique.

II. — Comparaison de l'évaporation du bac et des principaux paramètres du climat

2.1. — *Les mesures d'évaporation sur bac classe A* (fig. 1*a*)

sont effectuées sur sol naturel (nu en saison sèche, enherbé en saison des pluies) dans huit stations météorologiques. Les observations sont faites à 06 h, 12 h et 18 h (08 h sur les 3 stations agrométéorologiques), et les données exploitées représentent les valeurs de 24 h, de 06 h à 06 h. On tient compte des pluies enregistrées, et, en pratique, les données cumulées sur 3, 7 ou 10 jours sont effectivement utilisées dans les calculs.

Les données correspondant aux phases diurne et nocturne sont cependant disponibles (fig. 1*b*). On peut ainsi mettre en évidence l'importance de l'évaporation durant la nuit. L'exemple de Bobo-Dioulasso est donné ici. On constate un maximum diurne en février, et un minimum en août.

On a indiqué également la variation de l'évaporation quotidienne sur une base interannuelle ; on passe en moyenne de 7,5 mm/jour en février à 2,5 mm/jour en août. De nuit, l'évaporation, due essentiellement à des phénomènes advectifs, passe de presque 4 mm/nuit en mars à environ 1 mm/nuit en août. On notera cette dernière valeur, encore importante, en saison des pluies. Le *rapport* des évaporations diurne et nocturne (fig. 1*c*), reste remarquablement stable au cours de l'année. On peut attribuer une partie au moins du maximum d'avril au fait que les jours sont alors les plus longs, et la sécheresse édaphique maximale (le jour se lève à 5 h 30 et se couche à 18 h 30), tandis qu'en janvier la phase diurne est plus courte (6 h 30 à 17 h 30). La constance du rapport traduit l'importance des effets de l'environnement sur un bac situé sur un sol pratiquement toujours nu, situé sur un aérodrome.

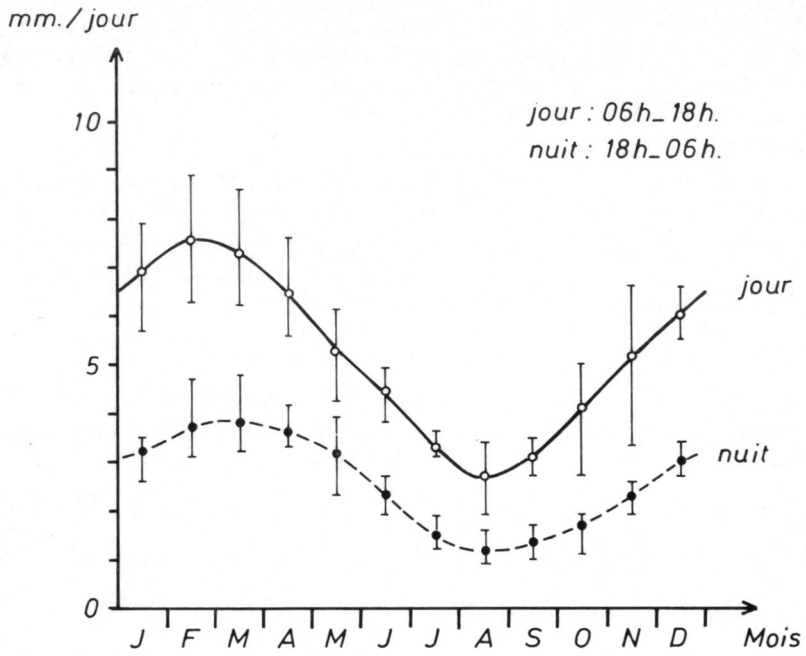


FIG. 1b. — *Evaporation brute du bac classe A à Bobo-Dioulasso.*
Crude evaporation of class A pan in Bobo-Dioulasso.

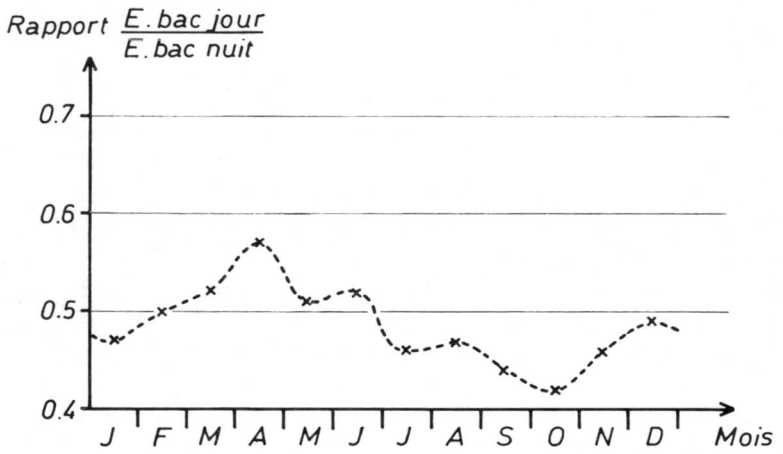


FIG. 1c. — *Rapport des évaporations diurne et nocturne du bac A à Bobo-Dioulasso.* 1970-1977.
Comparison between night and day evaporations rates for Bobo-Dioulasso.

2.2. — *L'influence du vent sur l'évaporation du bac*

est à noter aussi :

Les bacs A sont installés sur un caillebotis en bois et sont entourés d'une cage en grillage qui les protège des animaux qui, sans cela, chercheraient à y boire. L'implantation d'origine comportait un anémomètre placé dans la cage, à 50 cm au-

dessus du sol. Mais, dans la zone étudiée, cette norme apparaît inapplicable, en raison de la faible vitesse moyenne des vents, souvent inférieure au seuil de démarrage des anémomètres totalisateurs employés ; seules les pointes de vent sont alors enregistrées, et il est impossible de traiter de telles données. Pour éviter ce problème, les anémomètres ont été placés à la hauteur standard de 2 m (ce qui permet de calculer plus aisément ETP Penman). Il n'a pu être tenu compte de ces données dans la présente étude, la modification ayant été apportée à partir de 1976. Ceci est regrettable, car dans la littérature, le vent apparaît souvent (FAO, 24, 1976) comme le paramètre primordial utilisé dans les corrections apportées au bac A. On observe effectivement une certaine corrélation entre l'évaporation et la vitesse du vent à 10 m enregistrée à Bobo-Dioulasso.

2.3. — *Relation entre la température de l'eau du bac et la température de l'air*

La température de l'eau du bac est relevée trois fois par jour, sur un thermomètre flottant. On compare (fig. 2) l'évolution des écarts moyens mensuels des températures de l'eau et de l'air sous abri aux mêmes heures (T abri-T eau). On compare sur la figure 2*a*, les valeurs moyennes pour Bobo-Dioulasso, Ouagadougou et Dori, ce qui

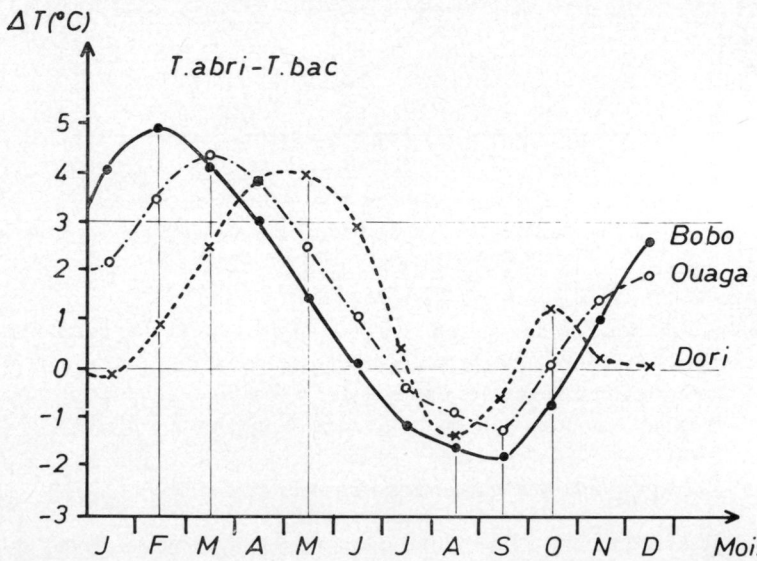


FIG. 2*a*. — *Moyennes mensuelles des écarts thermiques à Bobo-Dioulasso, Ouagadougou et Dori.*
Monthly evolution of thermical differences between screen and pan temperatures (daily mean) *at Bobo-Dioulasso* (11° N), *Ouagadougou* (12° N) *and Dori* (14° N).

met en évidence l'effet de la latitude : l'amplitude moyenne annuelle est de 7° à Bobo-Dioulasso (entre *février* et *septembre*), alors qu'elle ne dépasse pas 6° (entre *mars* et *septembre*) à Ouagadougou, et 5 °C (entre *mai* et *août*) à Dori. Un maximum secondaire d'octobre apparaît pour cette seule station, où les écarts thermiques moyens sont nuls de novembre à janvier.

On compare les écarts à 6 h et 18 h à Bobo-Dioulasso, figure 2*b*. Durant la saison des pluies (mai à octobre), les écarts sont peu marqués à 6 h ; l'air sous abri est plus chaud que l'eau en saison sèche, plus froid en saison des pluies. En saison sèche, la

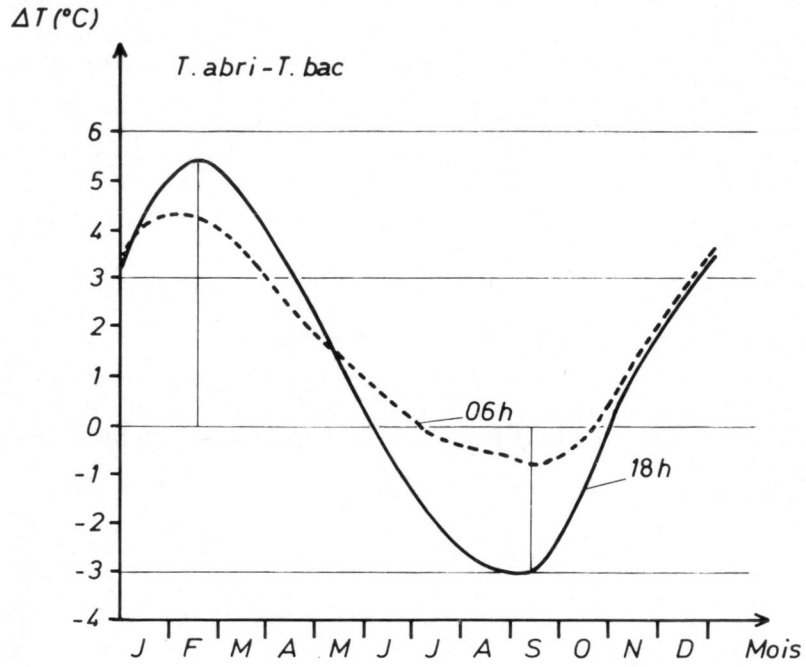


FIG. 2*b*. — *Ecarts thermiques à* 06 h *et* 18 h *à Bobo-Dioulasso.*
Temperature differences between screen and pan water at 6 AM *and* 6 PM *for Bobo-Dioulasso* (mean of daily differences for each month).

surface de l'eau du bac peut former paroi froide, et provoquer une condensation nocturne de vapeur d'eau atmosphérique. Ce phénomène est peu important, mais a pu être mis en évidence en analysant les données de 18 h et 06 h : en février, l'écart entre les températures de l'eau et de l'air peut atteindre en moyenne 5°5 à 18 h.

2.4. — *Influence des autres paramètres du climat* (fig. 1*a*)

On note une analogie entre l'évolution annuelle du *rayonnement global* et de l'évaporation du bac, comme Krishnan et Kushawaha (1973) l'ont fait remarquer. Mais l'analyse mensuelle montre qu'en Haute-Volta le rayonnement global se maintient à un niveau élevé pendant la phase prépluviale (mai-juin) alors que l'évaporation du bac décroît notablement. Ni la *température moyenne* de l'air (T), ni la *température minimale* moyenne (Tn) (fig. 1*a*) n'évoluent au cours de l'année comme l'évaporation : le maximum moyen le plus élevé se situe en avril (24 °C), alors que l'évaporation passe par un maximum en février. Le maximum thermique secondaire d'octobre et novembre ne se traduit pas sur la courbe d'évaporation. Par contre l'allure des courbes de températures moyennes et d'évaporation est analogue (maximum de saison sèche, minimum de saison des pluies).

2.5. — *Influence de l'humidité de l'air*

Il apparaît par contre que l'humidité relative de l'air (HR) (à partir de la moyenne des huit valeurs relevées quotidiennement de déficit de saturation de l'air) suit au cours de l'année une évolution parallèle à celle de l'évaporation du bac. Cette corrélation apparaît dans les travaux de plusieurs chercheurs travaillant en zone de mousson (Dancette, 1976 ; Krishnan et Kushawaha, 1973 ; Rijks, 1976 ; Schoch et Dancette, 1967 ; inter alia), mais n'est généralement pas prise en considération (FAO, 24, 1976). Il apparaît pourtant que le coefficient de corrélation est élevé (supérieur à 0,9) pour l'ensemble des stations x années analysées.

Ces différentes observations peuvent s'expliquer par le fait que les températures moyennes (25 à 30°), le rayonnement global (1 900 à 2 400 J cm^{-2}) et le vent (2,8 à 4,2 ms^{-1} à 10 m) varient peu au cours de l'année, alors que le déficit de saturation (ou l'humidité relative) de l'air présente une très importante fluctuation (de 19 à 81 p. 100). Ce pouvoir évaporant de l'air agit évidemment sur une surface d'eau

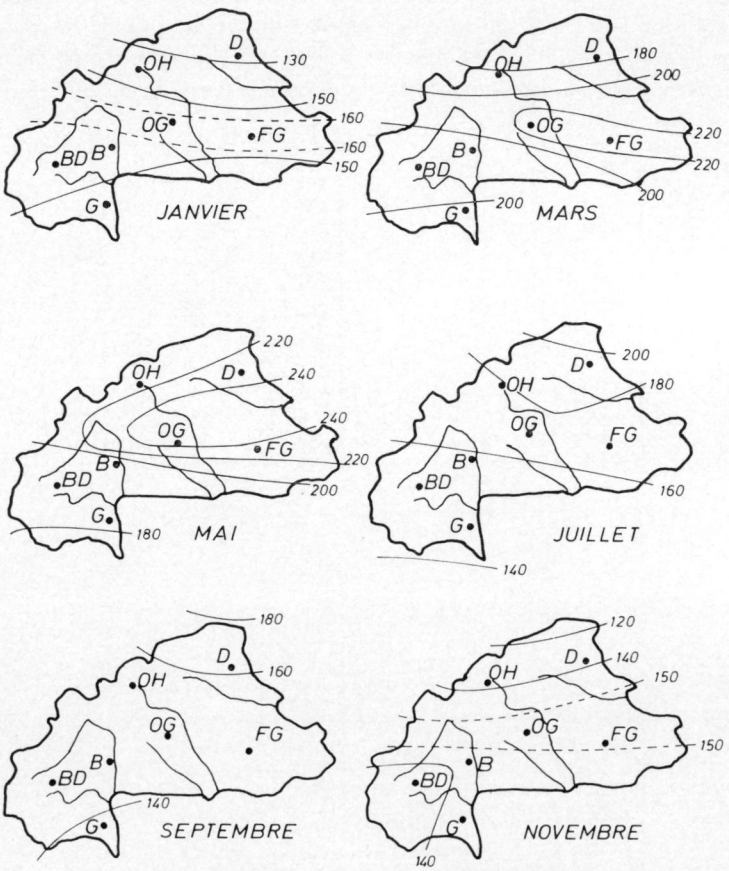


FIG. 3. — *Evapotranspiration potentielle calculée* (méthode Penman) *en Haute-Volta.*
Valeurs exprimées en mm par mois.

Potential evapotranspiration calculated by Penman's method in Upper Volta.
Values expressed in mm by month.

libre. Les autres paramètres introduisent des fluctuations supplémentaires, de second ordre, dont l'analyse peut permettre d'améliorer la corrélation trouvée.

2.6. — *Evaporation du bac et évapotranspiration potentielle*

La formule de Penman a été calculée pour la Haute-Volta (Ouedraogo et Baldy, 1976). Les données obtenues sont résumées dans les cartes de la figure 3. Les *figures* 4 présentent, sous forme de climatogrammes, la comparaison de ces deux séries de valeurs pour les huit stations retenues.

On notera l'évolution de la forme des climatogrammes en fonction de la *latitude* (Beregadougou et Dori, par exemple) et de la *situation* microclimatique : Bobo-Dioulasso est en situation de plateau, Farako-Ba est dans une vallée ouverte au Sud, ce qui réduit les échanges et donc l'évaporation. On peut rapprocher ceci des observations de Fortin et Seguin (1975), Hanson et Rauzi (1977) et de Schoch et Dancette (1967), parmi beaucoup d'autres auteurs.

L'environnement *immédiat* du bac joue un rôle lui aussi : sur les stations d'aérodrome, le sol est nu en toute saison ; les évaporations y sont plus fortes qu'en stations agrométéorologiques, particulièrement en saison des pluies, car ces dernières sont alors enherbées. Il en va de même des stations situées en ville (Ouahigouya et Dori,

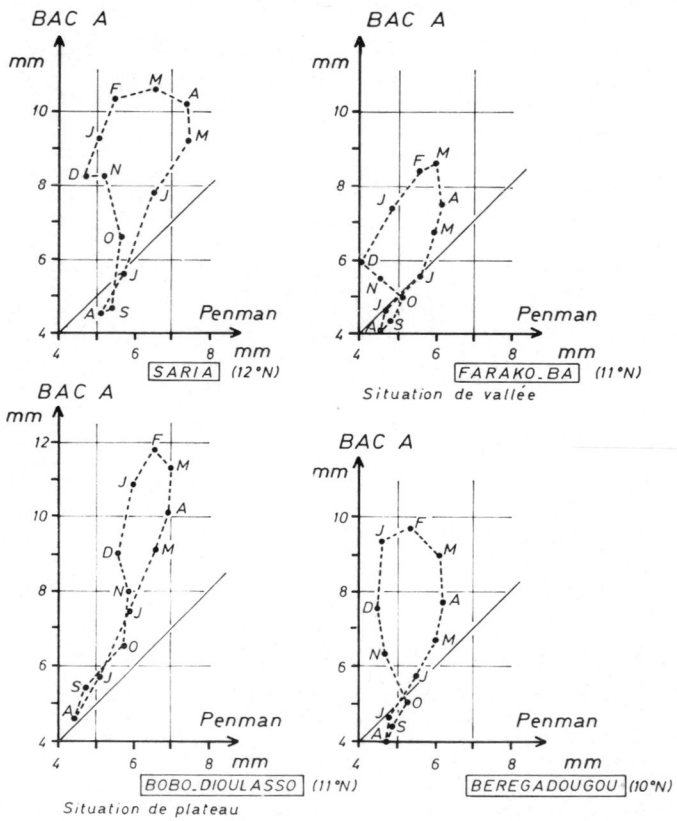


FIG. 4.

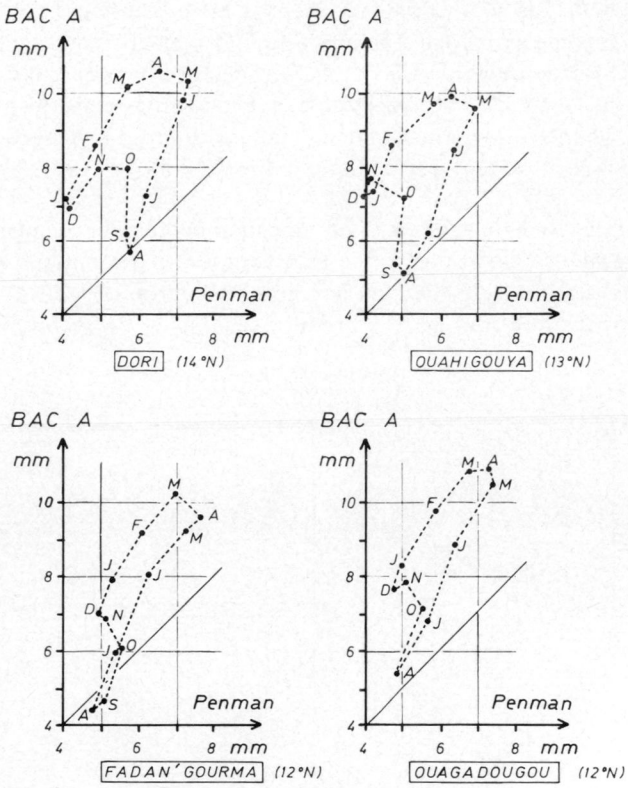


FIG. 4 (*suite*)

FIG. 4. — *Relation entre évapotranspiration potentielle Penman et évaporation du bac classe A.* Moyennes mensuelles exprimées en mm par jour.

Relation between Penman's formula and pan A evaporation. Monthly means, expressed in mm. a-day. Bobo-Dioulasso : air-field situation ; Farako-Ba : valley situation.

par exemple), abritées par des maisons et des arbres, et qui subissent un effet de brise-vent. L'ETP calculée réagit de façon analogue, mais avec des écarts absolus moins grands : les mesures sous abri sont influencées, elles aussi, par l'environnement méso- et microclimatique, mais à un degré moindre.

De façon générale, on peut constater que les évaporations des bacs classe A sont voisines de l'ETP Penman en saison des pluies, mais deviennent nettement supérieures en saison sèche, le rapport EA/ETP pouvant atteindre 2 de décembre à mars.

III. — Corrélation entre le rapport : évaporation bac/évapotranspiration calculée Penman et l'humidité relative de l'air

Les considérations qui précèdent permettent de proposer une corrélation entre l'évaporation du bac et les valeurs calculées par la méthode de Penman en faisant intervenir l'humidité de l'air. En toute rigueur, il aurait été préférable d'effectuer cette

relation avec le déficit de saturation de l'air, exprimé en millibars. Mais l'expérience montre que ce paramètre météorologique est généralement peu familier aux praticiens ; les faibles variations annuelles de la température ont conduit à proposer une corrélation plus aisée à établir, qui demande en pratique la seule intégration de l'humidité relative trihoraire (éventuellement sur diagramme d'hygrographe) et la lecture deux fois par jour (autant que possible à 6 h et 18 h) de l'évaporation constatée dans le bac.

Les figures 5 présentent cette relation, approximativement linéaire, et analogue pour toutes les stations étudiées ici. Selon la situation microclimatique et l'environnement du poste, le rapport E_A/E_P peut ou non devenir inférieur à 1 durant la saison des pluies : 4 stations sur huit sont dans le premier cas. En saison sèche, le rapport, tou-

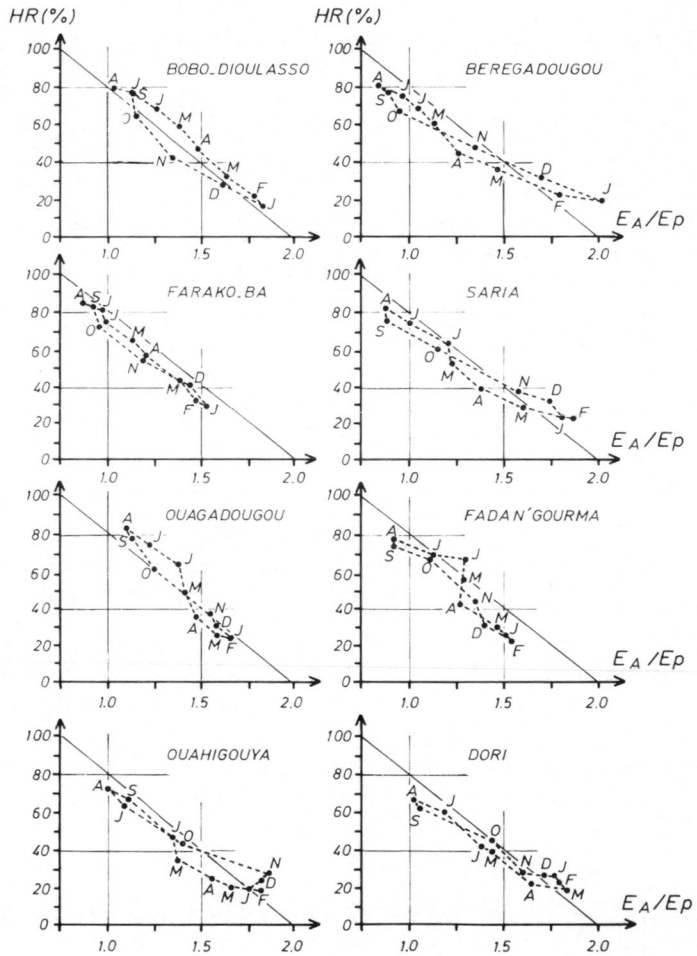


FIG. 5. — *Corrélation entre l'humidité relative sous abri et le rapport* EA/EP-(*bac A/Penman*), *pour huit stations de Haute-Volta.*

Correlation between relative humidity under screen and rate (EA/PET) *for eight meteorologic stations for Upper Volta.*

jours supérieur à 1, varie selon les stations, de 1,5 à 2 ; la comparaison des diagrammes montre que l'évolution saisonnière dépend de l'environnement : ainsi le rapport est plus faible en janvier à Farako-Ba (1,5) qu'à Beregadougou (2) : la position du bac dans la station à Beregadougou explique qu'en saison sèche l'aridité du milieu se fasse sentir plus qu'à Farako-Ba.

L'analyse des données climatiques montre que les corrélations sont améliorées si on applique des corrections supplémentaires en fonction du vent passé et de la durée d'insolation, par exemple. Mais de tels calculs alourdissent considérablement la méthode, et il deviendrait aussi simple alors de calculer ETP par la méthode de Penman.

Telle qu'elle est, il semble donc préférable de se baser sur une corrélation moyenne, que l'on peut estimer valable à moins de 10 p. 100 près dans 80 p. 100 des cas environ, ce qui est largement compatible avec les précisions recherchées dans les calculs de besoins en eau, les estimations d'évaporations de vastes bassins, et de façon générale les études de mise en valeur. La corrélation ne peut s'appliquer qu'à des périodes de plusieurs jours (5 à 10), pour intégrer la plupart des variations aléatoires des mesures.

Pour illustrer les variations des données individuelles, la figure 6 reporte les valeurs *mensuelles* (pour les huit années disponibles) des rapports EA/EP pour les

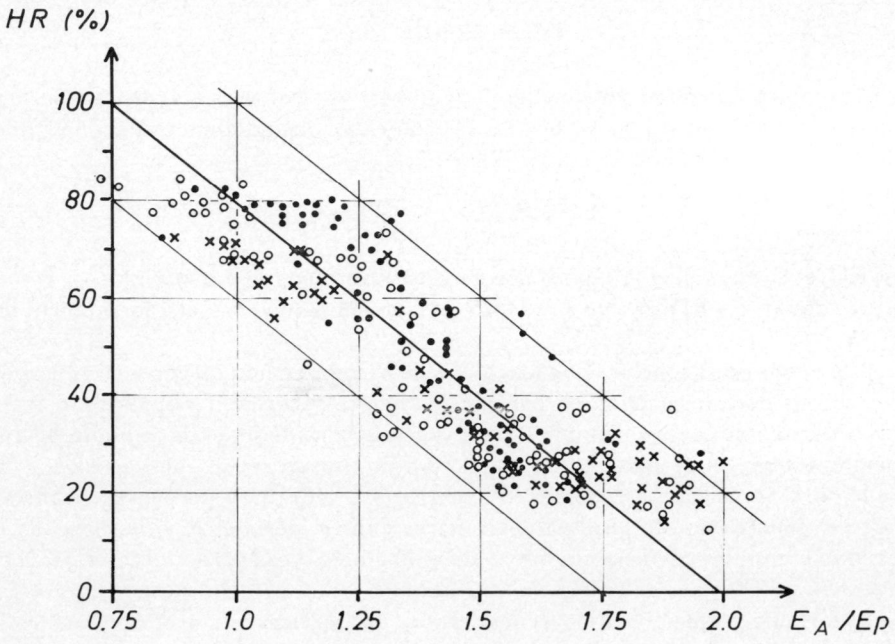


FIG. 6. — *Relation entre le rapport bac A/Penman* (EA/EP) *et l'humidité relative.*
Valeurs mensuelles 1968-1975 pour trois stations de Haute-Volta.

Relation between pan A/Penman rate and relative humidity.
Monthly values for eight years and three stations in Upper Volta.

● Ouagadougou
× Dori
○ Bobo-Dioulasso.

trois stations de Bobo-Dioulasso, Ouagadougou et Dori. Les écarts à la droite générale de régression peuvent s'expliquer par la situation particulière de chaque station, par l'influence plus ou moins forte de tel ou tel autre paramètre météorologique (ciel voilé par temps d'harmattan, par exemple), et par le fait de comparer les données annuelles *réelles* obtenues pour chaque mois et chaque année à la valeur *moyenne* mensuelle de l'ETP calculée Penman (indépendamment de l'année).

Pour ces 3 stations, la relation moyenne entre EA et ETP s'exprime ainsi : $\frac{EA}{ETP} = 2 - 1{,}25\ HR$. HR étant exprimé en valeur absolue, comptée entre 0 et 1.

Le résultat trouvé ($EA/EP \rightarrow 2$ pour $HR \rightarrow 0$) est à rapprocher de l'hypothèse émise par Bouchet (1964) concernant l'effet de l'advection sur une surface évaporante et confirmée expérimentalement par Fortin et Seguin (1975) : désignons par $(E_p)o$ la valeur qu'atteindrait l'évapotranspiration potentielle si, toute condition égale, l'ensemble de la région était irrigué ; le rapport $E_p/(E_p)o$ croît avec les conditions d'aridité pour être de l'ordre de 2 en conditions extrêmes, ce qui signifie que les apports advectifs peuvent avoir pour effet de doubler E_p. Quant à l'évaporation du bac E_A, il ressort de la présente étude que, par rapport à E_p, elle varie dans les mêmes limites sous l'effet des variations d'humidité.

IV. — Conclusions

L'évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal peut s'exprimer de façon simple à l'aide des données du bac A, au moins en zone soudano-sahélienne ; l'expression peut s'écrire ainsi :

$$ETP_{Penman} = \frac{E_{bac\ A}}{2 - 1{,}25\ HR}$$

avec ETP et E_a en mm, et HR exprimée en valeur absolue (de 0 à 1).

Le rapport EA/ETP évolue entre 0,75 lorsque HR tend vers 1 et 2 lorsque HR tend vers 0.

Rappelons pour conclure que les calculs de besoins en eau de périmètres irrigués, et les calculs de transpiration en périodes humides, nécessitent l'application de facteurs culturaux qui dépendent de l'espèce végétale considérée et de la phase du cycle végétatif auquel on se place (FAO, 24, 1976). En saison sèche, un vaste périmètre irrigué aura des besoins en eau *moyens* inférieurs à ceux d'un petit jardin isolé dans un désert ; mais selon la position des cultures dans le périmètre, et la direction des vents dominants, les coefficients varieront notablement. Les écarts constatés dépassent souvent 30 p. 100 et ne peuvent être négligés.

La formule simple proposée ici peut rendre des services aux praticiens confrontés avec l'estimation des besoins en eau des cultures en zone soudano-sahélienne, et doit permettre aussi d'améliorer l'estimation du bilan hydrique des bassins versants dans ces régions. Il semble, à l'analyse de la littérature, qu'elle peut s'appliquer en toute zone à climat de mousson ; elle nécessite l'adjonction d'autres paramètres (vent, températures de l'air...) en zones méditerranéennes ou océaniques tempérées.

Reçu pour publication en novembre 1978.

Remerciements

L'auteur remercie MM. Hallaire, Seguin et Perrier pour les précieux conseils qu'ils ont bien voulu lui adresser, et M. Ferren, technicien dessinateur pour l'exécution des schémas et cartes.

Summary

Use of a simple relation between US class A evaporation pan and Penman's formula to estimate potential evapotranspiration in soudano-sahelian countries

Evaporation measurements with class A pan have been systematically made in eight meteorological stations of the Republic of Upper Volta (Western tropical Africa), since 1968. An estimation of P.E.T. by Penman's method has also been made for this country, using standard screen data and global radiation (for five stations) and sunshine duration correlation (for seven others stations). The study of the annual variation of climatic conditions show that air saturation deficit, in soudano-sahelian countries, is closely correlated with pan evaporation intensity.

We find the simple relation between crude evaporation of class A pan (EA) and Penman's formula (ETP) :

$$\frac{EA}{ETP} = 2 - 1{,}25\ HR$$

with HR : mean relative humidity during the period considered between 0 and 1.

This expression is used to estimate PET in Upper Volta, on the basis of pan A Evaporometer, on a weekly or monthly time scale, and to determine water needs for crops in dry and wet seasons.

Zusammenfassung

Anwendung einer einfachen Beziehung zwischen dem Behälter Klasse A und der Pennmanschen Formel für die Schätzung der Evapotranspiration sudano-sahelischer Zone

Seit 1968 werden Ausdunstungsmessungen auf A Behälterin acht Wetterwarten in Obervolta systematischerweise durchgeführt. Eine Schätzung der Evapotranspiration mit Penmanscher Methode wurde auch Für dieses Land unter Anwendung der verfügbaren Strahlungsdaten und Sonneneinstrahlungsdauer gemacht. Die Untersuchung der Jahresentwicklung der Klimabedingungen zeigt, dass der Einfluss des Luftsättigungsdefizits auf die Behälterausdunstung in der sudano-sahelischen Zone wesentlich ist. Er wird in der folgenden einfachen Beziehung zwischen der Bruttoausdunstung des Behälters Klasse A EA und der Penmanschen Evapotranspiration wiedergegeben

$$\frac{EA}{ETP} = 2 - 1{,}25\ Hr$$

wo Hr die mittlere relative Luftfeuchtigkeit (zwischen 0 und 1) ist. Diese Beziehung wird benutzt, um die Evapotranspiration in Obervolta auf der Grundlage der Evapotranspirationsmessungen auf Behältern der Klasse A zu schätzen.

РЕЗЮМЕ

Применение простого соотношения между баком а класса и формулой пенмана для оценки потенциальной эвапотранспирации в зоне судан-сахель.

ЪАЛЬДИ К. М.

С 1968-го года, на восьми метеорологических станциях Высокой Вольта, систематически проводятся измерения испарений из бака А. Оценка потенциальной эвапотран спирации с помощью метода Пенмана проводится также в этой стране применяя данные об излучении и о длительности свободных инсоляций. Изучение эволюции климатичесих условий в течении

года показало, что в районе Судан-Сахель главным является влияние дефицита насыщенности воздуха на испарение нз бака. Оно выражается простым соотношением между валовым испарением из бака А Класса — EA, и потенциальной транспирацией Пенмана : $\frac{EA}{ETP} = 2 - 1{,}25\ HR$, в которой HR — выражает относительную влажность воздуха (между 0 и 1). Формула эта применяется для оценки ETP в Высокой Вольта на базе измерений испарения из бака А Класса.

Références bibliographiques

BOUCHET R. J., 1964. Evapotranspirations réelle et potentielle : facteurs climatiques. In *L'eau et la production végétale*, INRA Ed., 155-166.

DANCETTE Cl., 1976. Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. *Agron. trop.*, **4** (4), 321-338.

FORTIN J. P., SEGUIN B., 1975. Estimation de l'ETR régionale à partir de l'ETP locale : utilisation de la relation de Bouchet à différentes échelles de temps. *Ann. agron.*, **26** (5), 537-554.

HANSON C. L., RAUZI F., 1977. Class A pan evaporation as affected by shelter and a daily prediction equation. *Agric. Meteorol.*, **18** (1), 26-36.

HOUNAM A., 1973. Comparison between pan and lake evaporation. *WMO Techn. note*, 126/WMO 354, 60 pp.

ITIER B., PERRIER A., 1976. Présentation d'une étude analytique de l'advection : I. — Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. II. — Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. *Ann. agron.*, **27** (2), 111-140 et **27** (4), 417-433.

KRISHNAN A., KUSHAWAHA R. S., 1973. A multiple regression analysis of evaporation during the growing season of vegetation in the arid zone of India. *Agric. Meteorol.*, **12,** 297-307.

OAA/FAO, 1976. *Les besoins en eau des cultures*. FAO Bull. irrig. drainage, nº 24, 198 p.

OMM/WMO, 1966. *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration*, WMO Techn. note nº 83, 121 p.

OMM/WMO, 1970. *Guide des pratiques hydrométéorologiques*. OMM nº 168, 2e Ed.

PENMAN H. L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.*, **4** (1), 9-29.

PERRIER A., COMBRES J. Cl., 1977. Comm. pers.

POUYAUD B., 1976. Comm. pers.

OUEDRAOGO J. P., BALDY Ch., 1976. Note préliminaire concernant l'évapotranspiration potentielle en Haute-Volta et son calcul par la méthode du bilan d'énergie de Penman. Ronéo. Dion Météorol. Haute-Volta, 13 p.

RIJKS D. A., 1976. *Développement de la recherche agronomique dans le Bassin du Fleuve Sénégal. Agrométéorologie*. FAO, Rapport technique 2AGP, SF/REG 114, 171 p.

RIOU Ch., 1975. *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale*. ORSTOM Memoire, nº 80, 236 p.

SCHOCH P. G., DANCETTE Cl., 1967. Utilisation de l'évaporomètre de Piche pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. 2e *Congrès intern. agrométéorologique Leipzig*, 20/24/09-1967.

SEGUIN B., 1975. Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (région d'Avignon). *Ann. agron.*, **26** (6), 671-691.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 453-473.

Effet de la température des racines sur la croissance de jeunes plants de diverses variétés de Melon (*Cucumis melo* L.)

Georgette RISSER *, P. CORNILLON **, J. C. RODE * et Magali AUGE **

* *Station d'Amélioration des Plantes maraîchères,*

** *Laboratoire d'Agronomie,*

Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

De jeunes plants de quatre variétés de Melon : « Doublon », « Jacumba », « Persian Small type », et « Védrantais » ont été cultivés en solution nutritive, la température au niveau des racines étant constante et égale à 12, 15, 18 ou 21 °C. L'essai a été réalisé à deux périodes différentes : 9 jours en mai 1976 et 24 jours en mars 1977.

Lorsque la température du milieu racinaire est maintenue à 12 °C, la croissance du Melon est extrêmement réduite surtout en période de faible rayonnement.

En dessous d'une valeur limite qui varie selon les autres conditions de milieu (18 °C en 1976, supérieure à 18 °C en 1977), une élévation de la température du substrat entraîne une augmentation de la consommation hydrique, du nombre de feuilles émises, du poids frais et sec des plantes, de la teneur en azote et éléments minéraux de la matière sèche du feuillage. Par contre le pourcentage de matière sèche des tissus diminue.

« Persian Small type » réagit plus défavorablement aux températures des racines inférieures à 15 °C que « Doublon » et « Védrantais », ceci étant d'autant plus net que le rayonnement reçu est plus faible.

« Jacumba » se comporte très différemment des autres variétés aux températures racinaires de 18 et 21 °C, surtout en période de faible rayonnement : sa consommation hydrique est plus faible, sa matière sèche plus riche en éléments minéraux.

Introduction

Diverses recherches ont été entreprises à la Station d'Amélioration des Plantes maraîchères d'Avignon-Montfavet pour mettre en évidence d'éventuelles différences de comportement variétal aux basses températures chez le Melon.

Dans le cadre des observations préliminaires, nous avons étudié l'influence particulière de la température au niveau des racines sur la croissance de Melon en début de végétation. En effet, ce facteur joue un rôle essentiel dans l'absorption de l'eau et des éléments minéraux nécessaires à la plante et agit sur la vitesse du métabolisme des produits indispensables à la partie aérienne ; or au printemps, au moment de la mise en place des cultures de Melon, il apparaît souvent de grandes différences entre la température du sol et celle de l'air, notamment dans les cultures semi forcées sous les petits abris plastiques.

Matériel et méthodes

1. — *Variétés*

L'essai a été fait sur quatre variétés bien différentes : « Doublon » (origine I.N.R.A. France), « Védrantais » (origine : Vilmorin, France), « Persian Small type » (origine : Université du Michigan U. S. A.) et « Jacumba » (origine : Université d'Arizona U.S.A.). « Doublon » et « Védrantais » appartiennent toutes deux au groupe variétal « Cantaloup Charentais » très cultivé en France mais « Védrantais » est plus vigoureuse et moins précoce que « Doublon » en culture forcée. « Persian Small type » a été choisi pour sa grande vigueur et « Jacumba » pour sa sensibilité à un dessèchement des feuilles adultes (crown blight) observé dans des conditions mal déterminées.

2. — *Températures testées*

Les quatre températures du substrat expérimentées ont été 12 °C, 15 °C, 18 °C, et 21 °C avec une précision de $\pm$ 0,5 °C.

En 1977, un accident s'est produit dans le bac maintenu à 18 °C où la température est montée à 35 °C pendant quelques heures le 14 mars.

La température de l'air ambiante était très fluctuante comme le montre le tableau 2.

3. — *Dispositif expérimental*

L'essai a été réalisé en serre vitrée chauffée, dans 4 bacs thermostatés maintenus aux températures choisies grâce à un réfrigérant et une résistance chauffante placés dans l'eau des bacs. Dans ces bacs étaient placés des pots contenant chacun une plante plongeant dans un litre de solution nutritive aérée par l'envoi de bulles d'air comprimé (fig. 1). La composition de la solution nutritive (type Hoagland) est rapportée dans le tableau 1. Elle est complétée avec tous les oligoéléments nécessaires à la croissance et

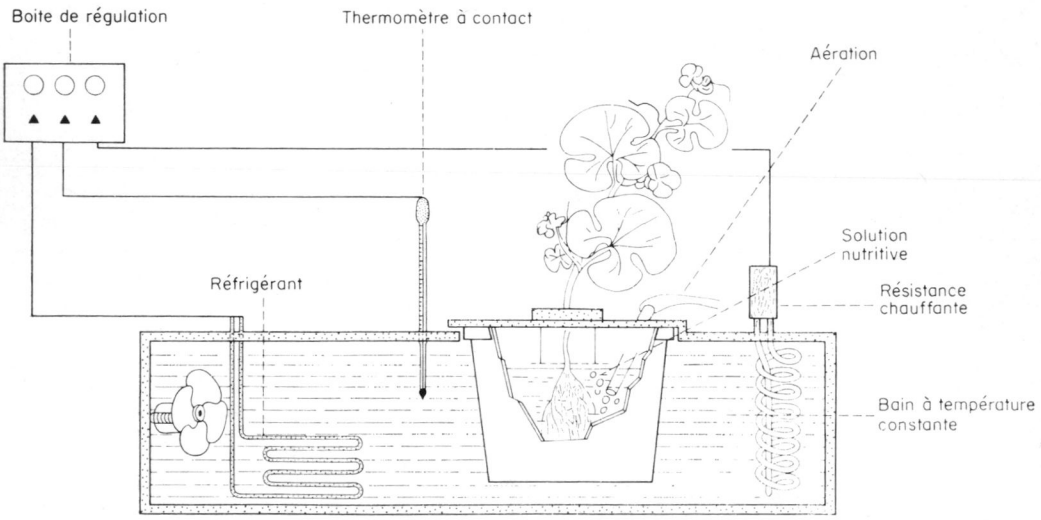


FIG. 1. — *Schéma simplifié du dispositif expérimental de culture.*
Experimental device.

TABLEAU 1

Composition de la solution nutritive (meq . l^{-1}). Composition of nutrient solution (meq . l^{-1})

	NH_4^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Total
NO_3^-		6	8		14
$PO_4H_2^-$	1				1
SO_4^{--}				4	4
Total	1	6	8	4	19

au développement de la plante, dont le manganèse à la concentration de 0,5 mg . l^{-1}. Le pH de la solution est égal à 5,2 $\pm$ 0,2. La solution a été renouvelée à intervalles de trois ou quatre jours. Les plantules de Melon préalablement élevées dans du sable stérilisé ont été placées dans le dispositif, au stade deuxième feuille pointante ; pendant quelques jours (6 au 9 mai en 1976, 24 février au 2 mars en 1977), la température des 4 bacs a été maintenue à 18 °C pour permettre une bonne reprise des plantes avant le réglage définitif des températures.

En 1976, il a été observé six répétitions de une plante par variété et température et en 1977, huit répétitions de une plante par variété et température.

4. — *Dates des essais*

L'étude a été conduite à deux saisons différentes, pour se placer dans des conditions d'éclairement variées.

— 1976 : Semis : 21 avril ; repiquage : 6 mai ; réglage à la température choisie : 9 mai ; arrêt de l'essai : 17 mai.

— 1977 : Semis : 9 février ; repiquage : 22 février ; réglage à la température choisie : 2 mars ; arrêt de l'essai : 23 mars.

La moyenne journalière et les valeurs extrêmes de certaines données climatiques pouvant caractériser ces deux périodes sont rapportées dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Caractérisation climatique des deux périodes d'essai. Climatic characteristics during the two experiments.

	1976 (6 au 17 mai)			1977 (22 février au 23 mars)		
	minimum	moyenne	maximum	minimum	moyenne	maximum
Température moyenne de l'air sous abri de type M. N.	15,5	17,7	20,1	5,4	10,9	17,5
Durée d'insolation en heure/jour.	0,0	10,6	13,4	0,0	6,3	10,5
Rayonnement global (MJ/m^2/jour)	5,9	22,2	27,5	2,6	11,5	16,8
Température maximum de l'air sous serre	31	37,6	43	26	32,6	40
Température minimum de l'air sous serre	16	17,1	17,5	10	14,0	17

L'essai a été arrêté lorsque les racines des plantes maintenues à 21 °C emplissaient suffisamment les pots pour que le renouvellement de la solution ne puisse se faire sans dommage.

5. — *Observations et mesures effectuées*

a) *Observation et pesée des plantes.*

Pendant la durée de l'essai, on a noté l'aspect général des plantes et le nombre de feuilles déployées. A la fin des essais, les parties aérienne et racinaire de chaque plante ont été pesées avant et après dessiccation sous vide.

b) *Consommation hydrique.*

A chaque renouvellement de la solution nutritive, on apportait un litre de solution par pot après aspiration du restant de la solution antérieure. La quantité totale de liquide ainsi recueillie par variété et température était mesurée, ce qui permettait de calculer par déduction la quantité d'eau absorbée par les plantes depuis le précédent changement de solution.

c) *Analyse minérale.*

La détermination des éléments minéraux dans les tissus végétaux est opérée en utilisant les méthodes mises au point par le Comité Inter-Instituts qui a étudié le dosage des éléments majeurs : N organique Kjeldahl, P, K, Ca et Mg (C. I. I., 1973).

6. — *Analyse statistique*

Le dispositif expérimental utilisé ne permettait d'analyser statistiquement que les différences variétales à une température donnée. Selon les cas, nous avons utilisé l'analyse de variance ou le test non paramétrique de Friedman (Bridabe *et al.*, 1972).

Résultats

1. — *Observations visuelles sur la croissance des plantes*

« *Doublon* », « *Védrantais* » : aucune anomalie constatée.

« *Jacumba* » :

— 1976 : cette variété s'est distinguée des trois autres dès la mise en place de l'essai : 24 h après le repiquage en solution nutritive, les plantules de « Jacumba » étaient encore partiellement flétrissantes, alors que celles des trois autres variétés avaient repris une turgescence normale. Le 11 mai, soit 5 jours après le repiquage, les plantules à 12 °C étaient encore légèrement flétrissantes et présentaient des taches nécrotiques sur la première feuille ; à 15, 18 et 21 °C les plantules étaient turgescentes mais certaines (4 à 15 °C, 1 à 18 °C, 2 à 21 °C) présentaient des taches nécrotiques. Au cours du temps, ces nécroses se sont accentuées à toutes les températures.

— 1977 : le 7 mars, on a observé quelques plantes légèrement flétrissantes avec nécroses partielles des cotylédons à toutes les températures. A 18 °C et 21 °C, ces nécroses se sont aggravées avec le temps en s'étendant aux premières feuilles.

« *Persian Small type* » :

— 1976 : à la dernière notation le 17 mai, les plus jeunes feuilles des plantes à 15 °C ont montré des symptômes de décoloration internervaires.

— 1977 : à 12 °C, on a observé à partir du 15 mars un jaunissement du feuillage, puis le 18 mars un flétrissement des cotylédons suivi le 21 mars d'un flétrissement général chez trois plantes ; à 15 °C, on a seulement observé un jaunissement du feuillage.

2. — *Nombre de feuilles de la tige principale*

La figure 2 représente le nombre de feuilles aux diverses dates d'observations pour chacune des variétés et des températures. Dans les deux essais le nombre de

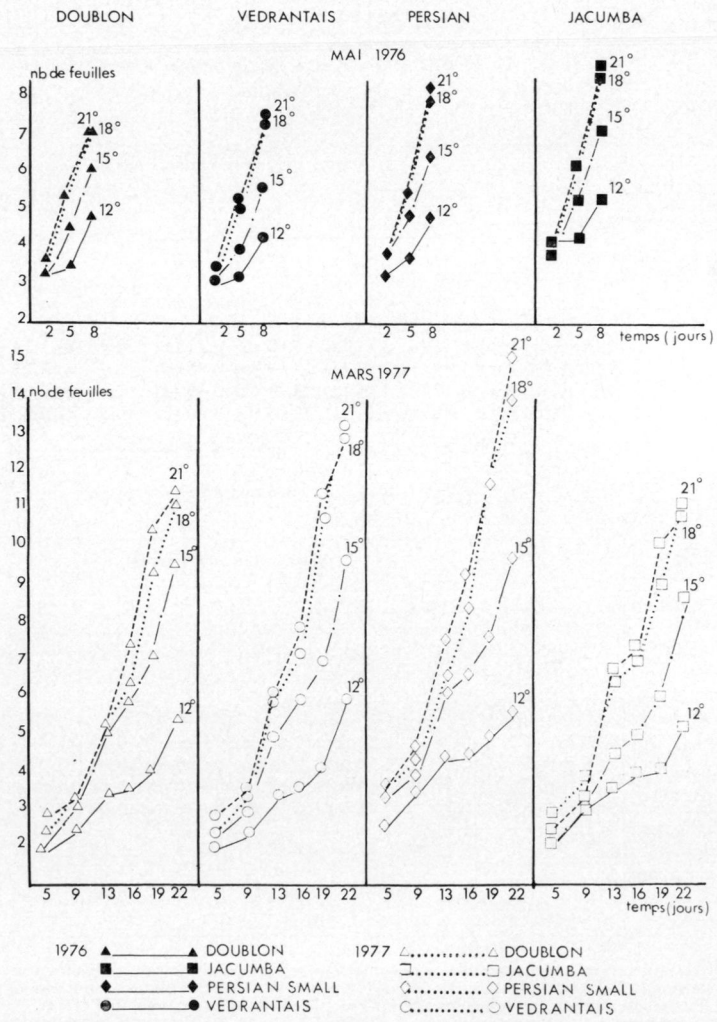


FIG. 2. — *Evolution du nombre de feuilles sur la tige principale selon la température des racines.*
Influence of root temperature on the number of leaves on the main axis.

feuilles croît avec la température de 12 à 18 °C, mais très peu de différences sont observées entre 18 et 21 °C. Toutes les variétés réagissent de la même façon dans les deux essais.

3. — *Poids des plantes et pourcentage de matière sèche*

Les tableaux 3 et 4 récapitulent les poids secs et le pourcentage de matière sèche à la fin de l'essai. Le poids des plantes croît quand la température du milieu racinaire augmente. La courbe de réponse des poids en fonction de cette température présente un point d'inflexion entre 15 et 18 °C d'autant plus marqué que le rayonnement global est plus grand.

TABLEAU 3

Poids sec des plantes en fin d'essai (en gramme/plante)
Plant dry weight (g. plant $^{-1}$).

	Partie aérienne (aerial part)							
	1976				1977			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
	* **							
Doublon	1,01 (0,05) (ab)	1,53 (b)	2,74 (b)	3,00 (b)	0,32 (b)	0,97 (b)	1,13 (c)	1,57 (c)
Védrantais	0,86 (0,04) (bc)	1,48 (b)	2,90 (b)	2,89 (b)	0,48 (a)	1,47 (a)	2,03 (b)	2,35 (b)
Persian	1,13 (0,12) (a)	2,17 (a)	4,05 (a)	4,21 (a)	0,49 (a)	1,41 (a)	2,68 (a)	3,50 (a)
Jacumba	0,70 (0,05) (c)	1,71 (b)	2,51 (c)	2,01 (c)	0,28 (b)	0,50 (c)	0,82 (d)	0,96 (d)
Moyenne variétale	0,93	1,72	3,05	3,03	0,39	1,09	1,67	2,10
Erreur type de la moyenne variétale		0,125	0,16	0,27	0,03	0,09	0,13	0,14
	Partie racinaire (roots)							
	1976				1977			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
								** *
Doublon	0,20 (a)	0,21	0,55 (bc)	0,67 (a)	0,036 (b)	0,13 (c)	0,28 (b)	0,40 (b) (0,03)
Védrantais	0,15 (b)	0,22	0,59 (ab)	0,61 (a)	0,050 (a)	0,18 (a)	0,49 (a)	0,61 (a) (0,05)
Persian	0,12 (b)	0,21	0,69 (a)	0,68 (a)	0,021 (c)	0,14 (b)	0,54 (a)	0,71 (a) (0,05)
Jacumba	0,14 (b)	0,24	0,45 (c)	0,33 (b)	0,031 (bc)	0,09 (d)	0,16 (c)	0,14 (c) (0,02)
Moyenne variétale	0,15	0,22	0,57	0,57	0,035	0,14	0,37	0,47
Erreur type de la moyenne variétale	0,013	0,02	0,04	0,06	0,004	0,01	0,03	

Les valeurs moyennes exprimées en gramme par plante sont suivies d'une lettre représentant le classement effectué selon le test de Duncan (seuil 0,05). Les valeurs suivies d'une lettre commune ne diffèrent pas significativement.

* Le test de Bartlett montre que les variances variétales (×) sont significativement différentes.

** L'analyse de variance et la comparaison des moyennes variétales ont été faites après transformation logarithmique homogénéisant les variances.

TABLEAU 4

Pourcentage de matière sèche (moyenne des pourcentages calculés plante par plante).
Influence of root temperature on percent dry matter (aerial part and roots).

	Système aérien							
	1976				1977			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
Doublon	12,6	10,2	8,1	7,8	11,0 (ab)	8,5	6,4 (a)	6,0 (a)
Védrantais	13,4	11,5	8,3	7,6	11,4 (b)	8,9	7,2 (bc)	6,2 (a)
Persian	13,4	10,8	8,1	7,7	10,3 (a)	9,0	6,7 (ab)	5,9 (a)
Jacumba	13,2	11,5	8,3	7,7	13,6 (c)	9,1	7,3 (c)	7,8 (b)
Moyenne	13,2	11,0	8,2	7,7	11,6	8,9	6,9	6,5
	Système racinaire							
	1976				1977			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
Doublon	6,7	5,4	5,8	4,4	5,1 (bc)	6,8	3,9 (ab)	3,2
Védrantais	6,1	6,3	4,8	3,9	5,5 (c)	7,0	4,7 (bc)	2,8
Persian	5,9	6,4	4,7	4,3	2,7 (a)	6,5	4,7 (c)	3,7
Jacumba	6,0	5,7	5,0	4,4	4,4 (b)	6,8	4,2 (a)	2,9
Moyenne	6,2	5,9	5,1	4,3	4,4	6,8	4,4	3,1

L'analyse statistique des différences variétales a été faite par le test de Friedman.
Les valeurs suivies d'une lettre commune ne diffèrent pas significativement.

Par contre le pourcentage de matière sèche diminue généralement quand la température du milieu racinaire augmente ; seule exception, la teneur en matière sèche des racines est plus basse à 12 °C qu'à 15 °C en 1977.

4. — *Importance relative des parties racinaire et aérienne de la plante*

Le tableau 5 présente le poids du système racinaire en pourcentage du poids de la partie aérienne. Quand on considère le poids frais, cette valeur passe par un minimum à 15 °C, par contre en 1977 elle augmente constamment quand on considère les poids secs.

5. — *Consommation hydrique*

Le tableau 6 présente la consommation hydrique moyenne par plante et par jour pendant la durée totale des deux essais.

Les figures 3 et 4 représentent les consommations hydriques par plante et par jour pour chacune des mesures faites. Les différences de consommation hydrique entre les diverses températures du milieu racinaire sont d'autant plus grandes que les plantes sont plus âgées et le rayonnement global reçu plus important.

TABLEAU 5

Importance relative du système racinaire.
(Poids des racines exprimé en p. 100 du feuillage. Moyenne des valeurs calculées plante par plante).
Influence of root temperature on relative root importance (average weight of roots in percentage of shoots).

	Poids frais (fresh weight)				Poids sec (dry weight)			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
1976								
Doublon	37 (ab)	25 (ab)	28 (b)	40	19 (a)	13	20 (a)	22
Védrantais	35 (b)	27 (ab)	36 (a)	46	18 (a)	16	21 (a)	23
Persian	23 (c)	18(b)	30 (ab)	29	10 (b)	10	17 (b)	16
Jacumba	43 (a)	28 (a)	30 (b)	31	20 (a)	14	18 (ab)	16
Moyenne	35	25	31	37	17	13	19	19
1977								
Doublon	25 (b)	17 (b)	33 (a)	48 (a)	11 (a)	13 (b)	24 (a)	26 (a)
Védrantais	22 (b)	15 (bc)	38 (a)	59 (ab)	11 (a)	15 (ab)	25 (a)	26 (a)
Persian	16 (c)	14 (c)	28 (b)	33 (b)	5 (b)	10 (c)	20 (b)	20 (b)
Jacumba.....	35 (a)	27 (a)	39 (a)	41 (b)	11 (a)	21 (a)	20 (b)	15 (c)
Moyenne	25	18	35	47	9	15	22	21

L'analyse statistique des différences variétales a été faite par le test de Friedman.
Les valeurs suivies d'une lettre commune ne diffèrent pas significativement.

TABLEAU 6

Consommation hydrique moyenne (ml/plante/jour).
Average water absorption (ml. $plant^{-1}.day^{-1}$).

	1976				1977			
	12°	15°	18°	21°	12°	15°	18°	21°
Doublon	38	45	90	97	44	49	51	63
Védrantais	26	37	98	94	46	41	64	65
Persian	29	49	111	115	35	47	63	83
Jacumba	24	53	79	64	32	40	47	52
Moyenne	29	46	95	93	39	44	56	66

Le tableau 7 présente la production de matière sèche en mg par ml d'eau consommée en fin d'essai. En 1976, les différences d'efficience de l'eau ainsi calculées sont peu importantes ; en 1977 par contre, la quantité de matière sèche synthétisée par millilitre d'eau consommée est d'autant plus grande que la température du substrat est plus forte, l'efficience à 12 °C étant particulièrement faible ; à toutes les températures, elle est plus faible qu'en 1976, ce qui est sans doute lié à la plus longue durée de l'expérience et à la différence de rayonnement global entre ces deux périodes.

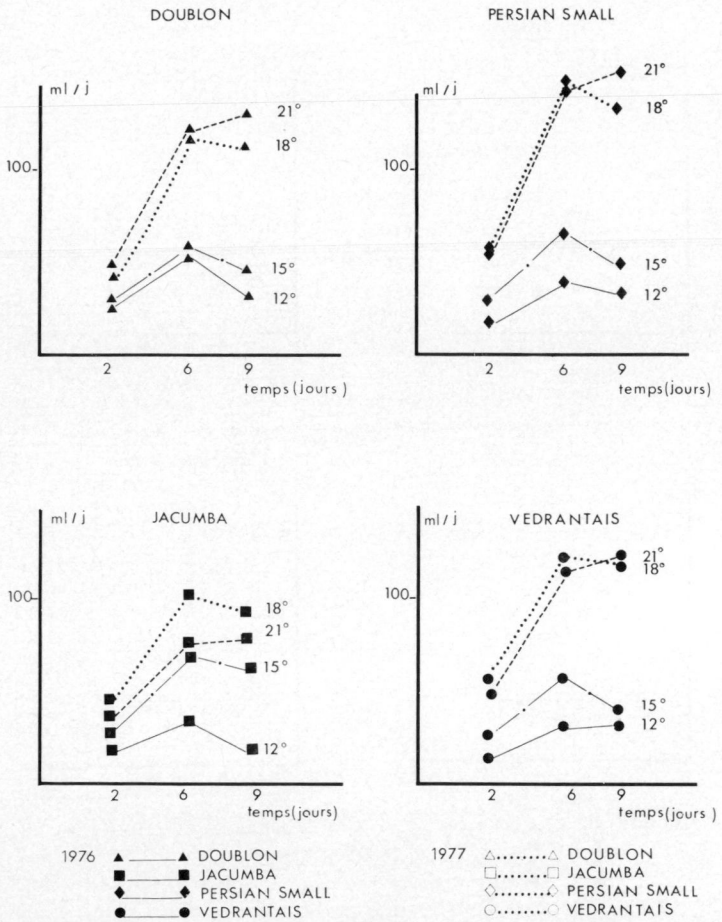


FIG. 3. — *Influence de la température des racines sur la consommation en eau en période de fort rayonnement* (moyenne de Rg pour les périodes successives précédent la mesure de consommation hydrique : 24, 26 et 19 M. J. m^{-2}. $jour^{-1}$).

Influence of root temperature on water absorption during a period of high radiant energy (average R for the successive period before the measurement of water absorption : 24, 26 and 19 M. J. m^{-2}. day^{-1}).

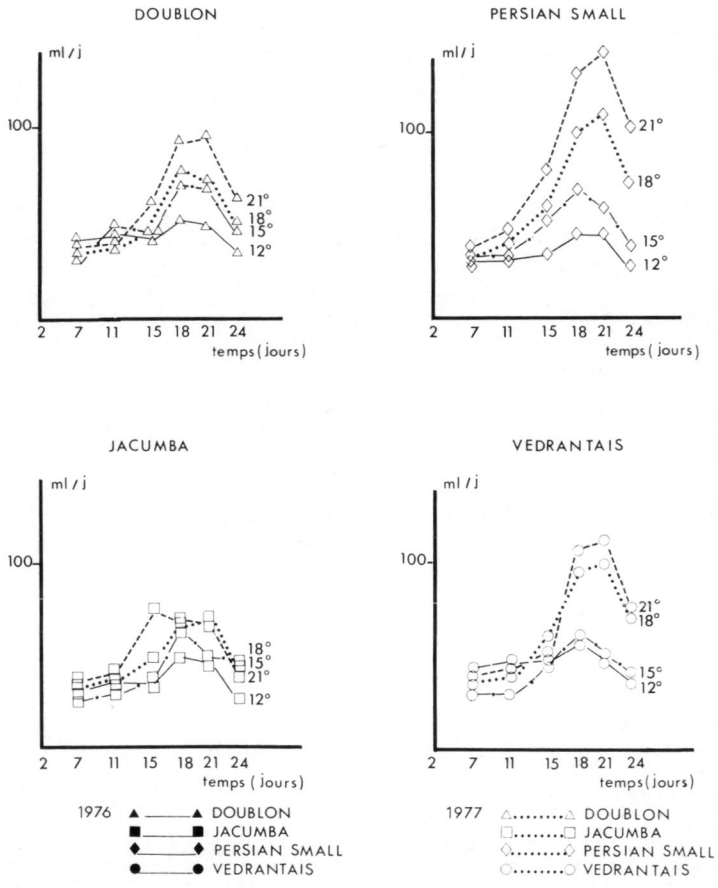


FIG. 4. — *Influence de la température des racines sur la consommation en eau en période de faible rayonnement* (moyenne de Rg pour les périodes successives précédent la mesure de consommation hydrique : 14, 9, 9, 15, 12 et 7 M. J. m^{-2}. $jour^{-1}$).

Influence of root temperature on water absorption during a period of weak radiant energy (average R for the successive period before the measurement of water absorption : 14, 9, 9, 15, 12 and 7 M. J. m^{-2}. day^{-1}).

TABLEAU 7

Effficience de l'eau consommée (production de matière sèche en mg par millilitre d'eau consommée).
Efficiency of water absorption (production of dry matter calculated in mg by ml of water absorption).

Variétés	1976				1977			
	12 °C	15 °C	18 °C	21 °C	12 °C	15 °C	18 °C	21 °C
Doublon	2,91	3,55	3,36	3,46	0,41	1,01	1,26	1,34
Védrantais	3,48	3,69	3,23	3,41	0,52	1,81	1,98	1,99
Persian	3,90	4,49	3,90	4,77	0,67	1,51	2,33	2,20
Jacumba	3,23	3,36	2,44	3,34	0,37	0,67	0,94	0,84
Moyenne	3,38	3,77	3,23	3,74	0,49	1,25	1,63	1,59

6. — *Teneurs en azote et en éléments minéraux*

Ces teneurs sont représentées dans les figures 5, 6, 7, 8, 9 et 10 respectivement pour l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le manganèse.

Dans les organes aériens le pourcentage des divers éléments minéraux augmente quand la température du milieu racinaire passe de 12 à 21 °C. Par contre, dans les racines, seuls les taux de phosphore et de potassium sont une fonction croissante de la température ; les teneurs en calcium et en magnésium demeurent à peu près constantes tandis que celles de l'azote diminuent quand la température s'élève de 15 à 21 °C.

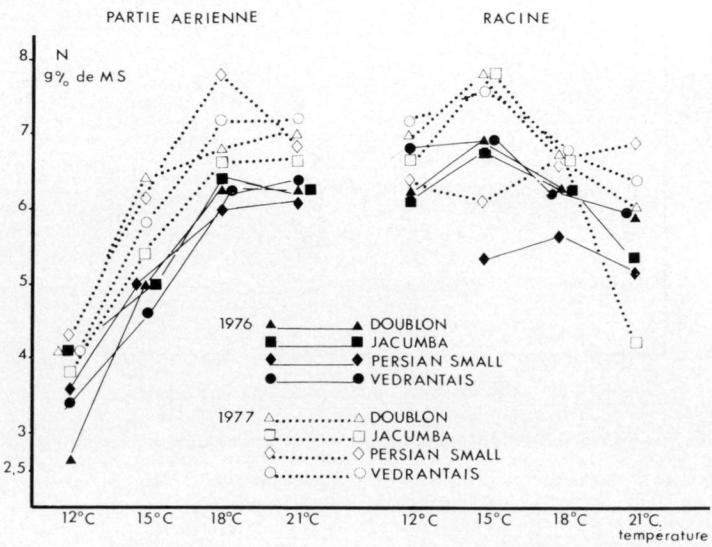


FIG. 5. — *Evolution de la teneur en azote selon la température et la variété.*
Influence of root temperature and cultivar on the nitrogen content of shoot and root (percentage dry weight basis).

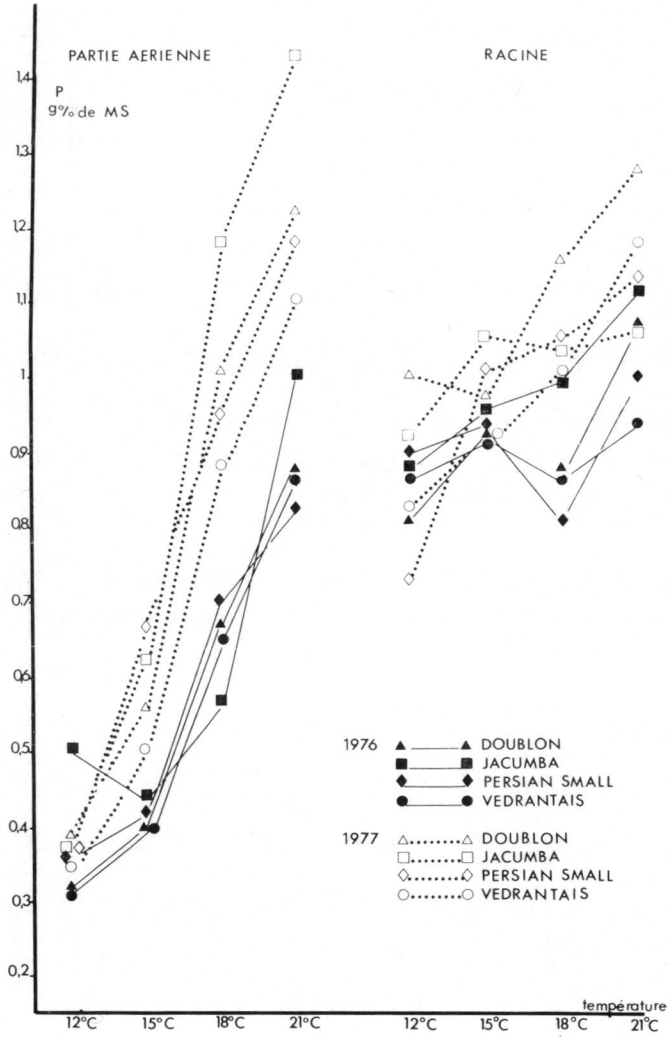


FIG. 6. — *Evolution de la teneur en phosphore selon la température et la variété.*

Influence of root temperature and cultivar on the phosphorus content of shoot and root (percentage dry weight basis).

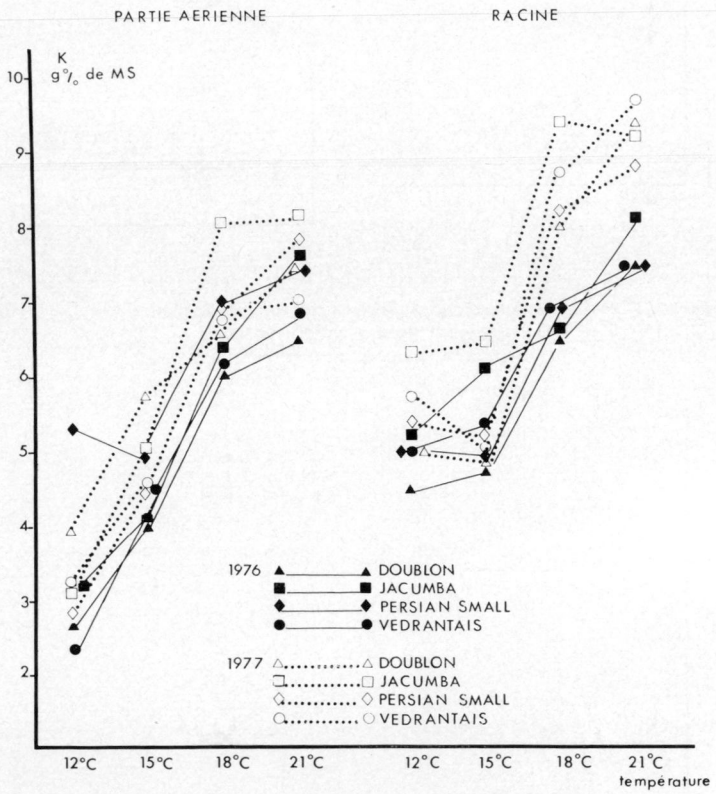


FIG. 7. — *Evolution de la teneur en potassium selon la température et la variété.*

Influence of root temperature and cultivar on the potassium content of shoot and root (percentage dry weight basis).

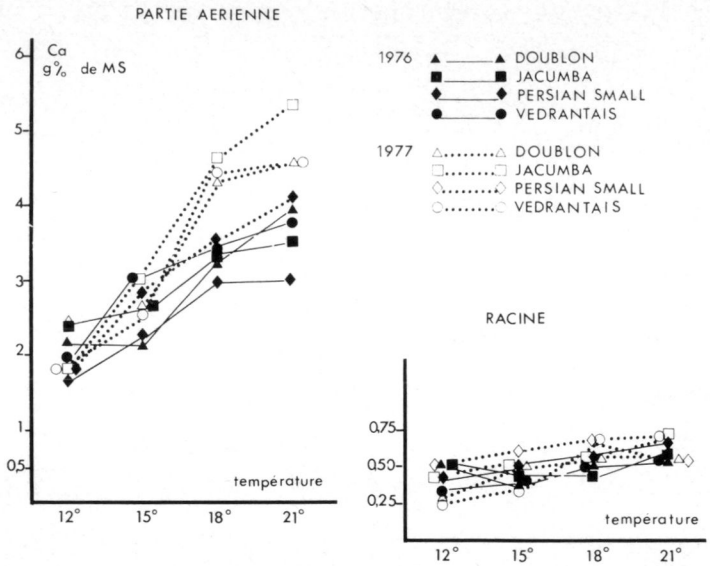


FIG. 8. — *Evolution de la teneur en calcium selon la température et la variété.*
Influence of root temperature and cultivar on the calcium content of shoot and root (percentage dry weight basis).

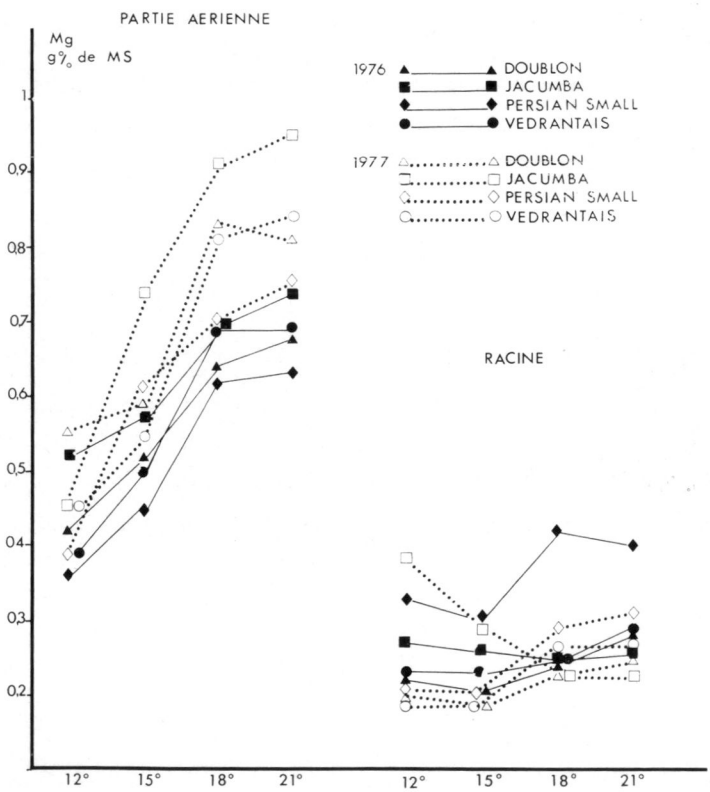


FIG. 9. — *Evolution de la teneur en magnésium selon la température et la variété.*
Influence of root temperature and cultivar on the magnesium content of shoot and root (percentage dry weight basis).

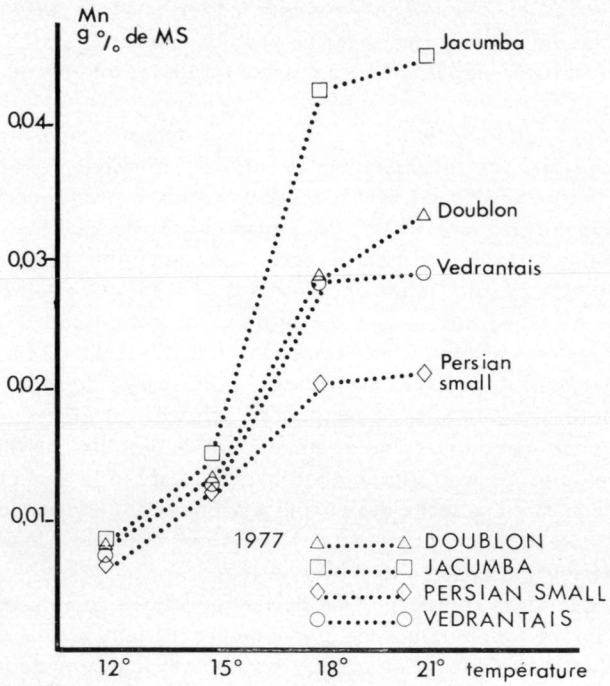


FIG. 10. — *Evolution de la teneur en manganèse de la partie aérienne selon la température et la variété.*
Influence of root temperature and cultivar on the shoot magnesium content (percentage dry weight basis).

Discussion

Au cours de la discussion des résultats nous ferons deux approximations :

— nous admettrons que les deux essais ont différé essentiellement par la durée du jour et l'ensoleillement, c'est-à-dire le rayonnement global reçu, alors qu'il y a eu aussi de légères différences de température du milieu aérien. La croissance plus lente observée en 1977 a permis d'observer les plantes pendant une durée beaucoup plus longue, ce qui a pu intervenir dans l'expression de certains phénomènes ;

— nous admettrons que seules les températures racinaires variaient alors que la température du substrat influait peut être aussi légèrement sur la température du feuillage.

1. — *Effet général de la température du substrat et du rayonnement*

La comparaison des résultats des deux essais confirme un phénomène bien connu, à savoir que la croissance du Melon est très dépendante du rayonnement : il aura suffi de 13 jours en mai 1976 pour produire plus de matières fraîche et sèche qu'en 29 jours en février-mars 1977. Les plantes produites en mai ont une plus forte

teneur en matière sèche, un feuillage à moindre teneur en azote et éléments minéraux, c'est-à-dire sans doute à plus forte teneur en produits carbonés.

La vitesse d'émission des feuilles, par contre est moins influencée par le rayonnement (fig. 2).

Ainsi que nous allons le voir, il y a une interaction température du substrat, rayonnement reçu sur certains phénomènes : il n'est donc pas possible de présenter l'action de la température du substrat indépendamment du rayonnement.

Lorsque leurs racines sont à 12 °C, les jeunes plants de Melon ne se développent que très lentement, surtout si le rayonnement reçu est faible (ainsi le poids moyen frais d'une plante de 29 jours n'est que de 4,3 g en 1977) : certaines variétés telles que « Persian Small type » présentent même dans ces conditions, des symptômes de décoloration et de flétrissement. Cette température de 12 °C paraît bien être la température limite inférieure des racines permettant la croissance du Melon.

Entre 12 et 18 °C, plus la température du substrat est élevée, meilleure est la croissance, ce qui se traduit par une augmentation du nombre de feuilles, des poids frais et sec des plantes, de la consommation hydrique, de la teneur en azote, calcium et manganèse de la matière sèche des parties aériennes et de la teneur en phosphore et potassium de toute la plante ; entre 12 et 15 °C, l'augmentation de poids de la partie racinaire est inférieure à celle de la partie aérienne.

Par contre, quand on compare l'effet des températures racinaires de 18 et 21 °C, on constate qu'un certain nombre de phénomènes restent à peu près constants ; nombre de feuilles émises, teneur en azote, calcium et magnésium de la matière sèche, consommation hydrique et poids en période de fort rayonnement ; en période de faible rayonnement, au contraire, la consommation hydrique et les poids sont plus élevés à 21 °C qu'à 18 °C.

Nous trouvons ainsi chez le Melon, le phénomène observé chez la plupart des espèces, à savoir que l'alimentation hydrique conditionnant la croissance est fonction de la température du substrat jusqu'à une valeur seuil qui dépend des espèces (Cooper, 1973). Avec le même dispositif expérimental que le nôtre, Cornillon (1974) a montré chez la Tomate, l'existence d'une valeur seuil d'environ 15 °C. Nos essais montrent que cette valeur limite supérieure dépend aussi des autres facteurs du milieu : ainsi chez le Melon, nous trouvons une valeur proche de 18 °C en 1976; mais en 1977 à une période de plus faible rayonnement, cette valeur est plus élevée. Ceci peut expliquer les différences observées dans les résultats de divers auteurs travaillant dans des conditions différentes (Cooper, 1973).

Cette valeur seuil est la résultante des effets cumulés de la température du substrat agissant sur les divers processus métaboliques du végétal. Ainsi, à l'action directe de la température sur l'absorption hydrique s'ajoutent les effets secondaires dûs aux différences de développement des plantes ; pour mesurer l'influence directe de la température du substrat sur l'absorption hydrique, il faut faire des mesures de courte durée, ce qui n'a pas été fait dans cette expérience. L'expérience faite sur Tomate (Cornillon, 1974) a montré des différences très importantes puisque pour une durée de 40 mn, la consommation d'eau par unité de poids sec de tomates dont les racines étaient dans un milieu maintenu à 15 ou 12 °C, ne représentait respectivement que 35 et 12 p. 100 de celle de tomates dont les racines étaient à 21 °C.

Dans les deux essais, la teneur en phosphore et en potassium est nettement plus importante à 21 °C qu'à 18 °C. Actuellement on admet que l'absorption du potassium

est un phénomène actif en relation dans une certaine mesure avec le flux d'ions H^+, et celle du phosphore semble en partie liée au niveau de la nutrition hydrique d'après Russel et Shorroch's (1959).

Les valeurs de deux des caractères observés sont d'autant plus basses que la température du substrat est plus élevée entre 15 et 21 °C : ce sont le pourcentage de matière sèche (tabl. 4) et la teneur en azote des racines (fig. 5). Ces résultats classiques eux aussi (Cooper, 1973) peuvent s'expliquer ainsi (Boote, 1977) :

— L'activité photosynthétique ne dépend pas directement de la température des racines alors que l'absorption de l'eau est directement tributaire de ce facteur : la résistance à l'absorption hydrique augmente quand la température du milieu racinaire diminue : on comprend donc qu'aux basses températures, on observe une diminution des teneurs en eau des tissus.

— Aux basses températures, l'azote absorbé en relativement faible quantité reste préférentiellement dans les racines, le transport vers la partie aérienne étant fortement ralenti. Quand la température est plus élevée, la migration s'accélère, d'où l'augmentation de la teneur en azote de la matière sèche dans le feuillage et sa diminution dans les racines. Parallèlement, l'utilisation plus rapide des produits de la photosynthèse à forte température contribue à diminuer le pourcentage de matière sèche et à faire croître le taux relatif d'azote.

Quand la température du substrat est inférieure à 15 °C, les quantités d'eau et d'éléments minéraux deviennent si faibles qu'on constate une inversion du phénomène (la teneur en azote des racines baisse, la teneur en matière sèche des racines baisse ou stagne selon les conditions de milieu).

L'effet différent de la température du milieu racinaire sur les racines et le feuillage se traduit par une évolution complexe du rapport partie racinaire-partie aérienne ainsi que le montre le tableau 5 : le rapport des poids frais est plus faible à 15 qu'à 12 °C, puis croît avec la température du substrat de 15 à 21 °C : cet accroissement est plus fort en 1977 qu'en 1976.

Le rapport des poids secs varie comme celui des poids frais en période de fort rayonnement, les variations étant toutefois moins importantes. En période de faible rayonnement, ce rapport croît quand la température s'élève de 12 à 18 °C, il reste pratiquement constant au-delà.

2. — *Effet de la température du substrat selon les variétés*

Cet essai s'insérant dans une série d'études destinées à mettre en évidence des différences de comportement variétal à basses températures, il était intéressant d'étudier avec précision les réactions des 4 variétés.

La simple observation des plantes pendant les essais montrait que les variétés réagissaient différemment aux basses températures du substrat : ainsi en période de fort rayonnement, « Jacumba » a montré des difficultés de reprise particulièrement nettes à 12 °C ; en période de faible rayonnement, « Persian » a présenté des symptômes de chlorose à 12 et 15 °C.

Comparaison de « Doublon » et « Védrantais », lignées d'un même type variétal.

— En 1976, période de fort rayonnement : ces variétés diffèrent très peu.

— En 1977, période de faible rayonnement : les poids frais et sec du feuillage et des racines de « Doublon » sont toujours inférieurs à ceux de « Védrantais ».

— La croissance de « Doublon » paraît plus déprimée que celle de « Védrantais » par le faible rayonnement. Par contre, les deux variétés semblent réagir de la même façon à la température du substrat.

Comparaison de « Persian » aux variétés « Doublon » et « Védrantais ».

— En 1976, période de fort rayonnement : les poids frais et sec du feuillage de « Persian » sont supérieurs à ceux de « Doublon » et « Védrantais » à toutes les températures. Les poids frais et sec des racines de « Persian » tendent à devenir inférieurs à ceux de « Doublon » et « Védrantais » aux basses températures alors qu'ils tendent à être supérieurs aux fortes températures.

Alors que chez « Doublon » et « Védrantais » la proportion racine-feuillage est plus importante à 12 °C qu'à 15 °C, elle est la même chez « Persian ».

— En 1977, période de faible rayonnement : les poids frais et sec du feuillage de « Persian » sont supérieurs à ceux de « Védrantais » à 18 et 21 °C ; ils n'en diffèrent pas significativement à 12 et 15 °C. Le poids sec des racines de « Persian » est significativement inférieur à ceux de « Védrantais » et « Doublon » à 12 °C.

A 12 °C, la proportion de racines est plus faible chez « Persian » que chez les autres variétés; de même, la teneur en matière sèche, en azote et en phosphore des racines.

— Il apparaît donc que « Persian » est plus sensible à l'action des basses températures que « Doublon » et « Védrantais », ceci étant particulièrement net en période de faible rayonnement : l'action défavorable des basses températures se manifeste particulièrement au niveau du système racinaire.

Etude des réactions de « Jacumba »

La variété « Jacumba » avait été mise spécialement dans l'essai pour savoir si la température du substrat était un des facteurs importants de l'apparition des nécroses physiologiques (crown blight) observées fréquemment en culture sous serre.

De nombreuses anomalies ont été constatées dans l'essai chez cette variété, particulièrement au niveau de la consommation hydrique et de la teneur en éléments minéraux. La consommation hydrique moyenne par plante et par jour de « Jacumba » est inférieure à celles des autres variétés à 18 et 21 °C (tabl. 6) ; cette infériorité est particulièrement nette pendant les périodes de fortes consommations hydriques (fig. 3). La teneur en éléments minéraux est généralement plus grande chez « Jacumba » que chez les autres variétés, cette supériorité étant plus marquée en période de faible rayonnement. La plus forte teneur en manganèse du feuillage de « Jacumba » à 18 et 21 °C en 1977 est peut-être à relier à la gravité des nécroses observées à ces températures chez cette variété puisque des chercheurs japonais ont montré que le manganèse induisait des symptômes nécrotiques chez le Melon : les concentrations trouvées en 1977 sont pourtant loin d'être celles que Masui *et al.* (1973) jugent critiques (2 000 ppm).

Par ailleurs en 1976, période de fort rayonnement, le poids sec du feuillage de

« Jacumba » n'est jamais significativement inférieur à celui de « Doublon » et « Védrantais » alors qu'en 1977, il l'est à toutes les températures; il semble donc que « Jacumba » soit particulièrement sensible à un faible rayonnement.

Conclusion

Ces essais permettent de se rendre compte des exigences élevées du Melon en ce qui concerne la température du substrat. Ces exigences peuvent être liées à l'origine géographique de cette espèce dont le berceau est situé dans les pays tropicaux.

Dans nos deux essais, la température du milieu racinaire a été un facteur limitant de la croissance en-dessous de 18 °C. Un accroissement de la température en-dessous de cette limite entraîne l'augmentation de la consommation hydrique, du nombre de feuilles émises, du poids des plantes et de la teneur en phosphore et en potassium. Par contre, le pourcentage de matière sèche des tissus diminue. Lorsque la température du substrat est fixée à 12 °C, la croissance du Melon est extrêmement réduite surtout en période de faible rayonnement.

L'action de la température du milieu racinaire dépend en partie des conditions climatiques au niveau des parties aériennes et notamment du rayonnement global reçu. Ainsi, en période de faible éclairement une température du substrat de 21 °C est plus favorable à la croissance qu'une température de 18 °C ; en période de fort éclairement on constate fort peu de différences.

Ces observations permettent d'expliquer certains accidents physiologiques observés au printemps, au moment de la mise en place des cultures. En sol nu, la reprise s'effectue mal dans les terroirs où les terres sont froides. De même, sous petit tunnel, des flétrissements semblent liés aux déséquilibres entre la température de l'atmosphère ambiante très élevée et celle du sol restée à un faible niveau.

Par contre, sous serre, l'effet bénéfique lié au chauffage par le paillage radiant doit être en relation avec l'apport direct d'une quantité élevée de calories au sol. Mais cette technique pose le problème de la résistance du Melon aux fortes températures du substrat.

Ces essais ont également permis d'observer des différences de comportement variétal, d'où la possibilité d'une sélection pour une meilleure adaptation aux basses températures du substrat.

Certaines variétés (ex. : « Persian Small type ») réagissent plus défavorablement que d'autres aux températures du substrat inférieures à 15 °C, ceci étant d'autant plus net que le rayonnement est plus faible. Il semble également que les variétés réagissent différemment à la faiblesse du rayonnement.

Aux températures racinaires de 15 °C et de 18 °C, la variété « Jacumba » se comporte très différemment des autres variétés, surtout en période de faible rayonnement : outre l'apparition de phénomènes nécrotiques sur le feuillage, on peut noter une plus faible consommation d'eau et une plus forte minéralisation de la matière sèche.

Reçu pour publication en novembre 1978.

Summary

Influence of root temperature on plant growth of various musk-melon cultivars (Cucumis melo *L.*)

Young plants of four musk-melon varieties : « Doublon », « Jacumba », « Persian Small type » and « Vedrantais » have been cultivated in nutrient solution, the temperature at the root level being constant and equal to 12 °C, 15 °C, 18 °C and 21 °C. The trial has been realised at two different periods: may 1976 and march 1977.

When the temperature of the root is maintained to 12 °C, the musk-melon growing is extremely poor especially during a period of weak radiation.

Below a limit value which varies according the other environmental conditions (18 °C in 1976, higher than 18 °C in 1977) a higher root temperature rises the water uptake, the number of leaves, the fresh and dry weight of the plants, and the percentage in nitrogen and mineral elements of the dry matter of the leaves. On the other hand the percentage of dry matter of the plant decreases.

« Persian Small type » reacts stronger to root temperatures lower than 15 °C than « Doublon » and « Vedrantais », this effect being all the more obvious as the radiation is weaker.

« Jacumba » behaves very differently from the other varieties to the root temperature of 18 °C and 21 °C, especially during a period of weak radiation : its water uptake is weaker, its dry matter richer in mineral elements.

Zusammenfassung

Wirkung der Worzeltemperatur auf das Pachstum von jungen flanzen verschiedener Sorten von Melonen (*Cucunis melo L.*)

Junge Pflanzen vier verschiedener Sorten von Melonen : « Doublon », « Jacumba » « Persian Small type » and « Védrantais » wurden in Nährlösung mit einer konstanten Wurzeltemperatur von 12, 15, 18 oder 21 °C kultiviert. Der Versuch wurde während zwei verschiedenen Perioden : 9 Tage im Mai 1975 und 24 Tage im März 1977 durchgeführt.

Wenn die Temperatur der Wurzelumwelt auf 12 °C gehalten wird, ist das Wachstum der Melonen insbesondere während Perioden mit schwacher Sonneneinstrahlung sehr beschränkt.

Unter einem Schwellenwert, der abhängig von den anderen Umweltbedingungen (18 °C in 1976, höher als 18 °C in 1977) variiert, bedingt eine Erhöhung der Substrattemperatur eine Erhöhung des Wasserverbrauchs, der zahl der erzeugten Blätter, des Frischund Trockengewichts der Pflanzen, des Gehalts an Stickstoff und Mineralelementen der Trockensubstanz des Laubs. Dagegen nimmt der Prozentsatz von Trockensubstanz der Gewebe ab.

« Persian Small type » reagiert ungünstiger auf Wurzeltemperaturen-unter 15 °C als « Doublon » und « Védrantais », und dies um so mehr je schwacher die erhaltene Einstrahlung ist.

« Jacumba » verhält sich ghuz anders als die an übrigen Sorten bei Wurzeltemperaturen von 18 und 21 °C, insbesondere während einer Periode schwacher Einstrahlung : ihr Wasserverbrauch ist niedriger und ihre Trockensubstanz reicher an Mineralelementen.

РЕЗЮМЕ

Влияние температуры на рост молодых растений разных сортов дыни (Cucumis melo)

РИССЕ ЖОРЖЕТТА, КОРНИЙОН П., РОД Ж. К., ОЖ МАГАЛИ

Молодые растения четырех сортов дыни : Дублон, Якумба, Персиан Смолл Тип и Верданте, культивировались на питательной смеси при постоянной температуре корней равной 12°, 15°, 18° и 21°. Опыт проводился в течении двух разных периодов : 9 дней в мае 1976, и 24 дня в марте 1977.

Когда температура корневой среды поддерживалась на уровне 12°, рост дыни сильно замедлялся, особенно в периоды слабого излучения.

Ниже уровня пороговой температуры, менявшегося в зависимости от иных условий среды (18° в 1976, выше 18° в 1977), повышение температуры субстрата вызывало усиление

поглощения воды, увеличение количества листьев, веса свежего и сухого вещества растений и содержания азота и минеральных элементов в сухом веществе листвы. Процент сухого вещества тканей при этом, напротив, уменьшался. Реакция сорта Персиан Смолл Тип на температуры корней ниже 15°, была более отрицательной чем реакция сортов Дублон и Верданте, и тем более сильной, чем слабее было полученное излучение.

Поведение сорта Якумба при температурах корней от 18° до 21° было совсем иным, особенно в периоды слабого излучения : потребление им воды — ослабевало, и его сухое вещество обогащалось минеральными элементами.

Références bibliographiques

BIDABE B., LE LEZEC M., BABIN J., 1972. Influence de l'origine et de l'éclaircissage sur la qualité gustative des fruits de la variété de pommier Golden Delicious. *Bull. Tech. Inform. Ingrs. Serv. Agric. Fr.*, **266**, 11-27.

BOOTE K. J., 1977. Root : shoot relationships. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **36**, 15-23.

C.I.I., 1973. Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux. *Oléagineux*, **28**, (2), 87-92.

COOPER A. J., 1973. Root temperature and plant growth. *Res. Rev.*, n° 4, *C. A. B.*, 73 p.

CORNILLON P., 1974. Comportement de la tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.*, **25** (5), 753-777.

MASUI M., ISHIDA A., SUZUKI E., 1973. Studies on the manganese excess of muskmelon. II. — Manganese concentration and pH in the nutrient solution. *J. Jap. Soc. hortic. Sci.*, **42** (1), 22-26.

RUSSEL R. S., SHORROCH'S V. M., 1959. The relationship between transpiration and the absorption of inorganic ion by intact plants. 5. *Exp. Bot.*, **10** (29), 301-316.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 475-498.

Etude bibliographique

Relations entre la conductivité hydraulique et la structure des milieux poreux

Agnès HUBERT

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Les équations de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux sont rappelées et commentées (conditions d'application, influence de la structure du milieu...). On présente ensuite deux approches qui permettent de relier la conductivité hydraulique, paramètre phénoménologique défini dans la loi de Darcy, à certaines caractéristiques physiques du milieu poreux. Dans le premier cas, on établit des relations statistiques entre la conductivité hydraulique et certains paramètres structuraux. Dans le deuxième cas, on recherche des modèles de fonctionnement, faisceaux plus ou moins complexes de capillaires, auxquels on applique les lois d'écoulement des liquides visqueux. L'intérêt et les limites de ces approches sont discutés à partir des principaux travaux publiés.

Introduction

Une grande partie de l'eau qui arrive à la surface du sol, sous forme de pluie ou d'eau d'irrigation, circule dans le sol au cours des phases d'infiltration, drainage, évaporation, redistribution, le sol étant la plupart du temps non saturé en eau.

L'eau influence ainsi un grand nombre de phénomènes qui ont lieu dans le sol : alimentation hydrique des plantes, transport des substances dissoutes, recharge des nappes. Il est donc important de développer la compréhension de son transport, en particulier en réalisant des études qui tendent à relier les caractéristiques de l'écoulement à certaines caractéristiques physiques du sol.

Un paramètre important de l'écoulement de l'eau dans les milieux poreux, compte tenu des formalismes mathématiques adoptés, est la conductivité hydraulique. L'objet de cet article est d'analyser les travaux qui se proposent de mieux comprendre et prévoir celle-ci.

Auparavant, on rappellera et discutera rapidement le formalisme utilisé pour décrire l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux.

I. — Description de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux

La loi proposée par Darcy en 1856 pour décrire l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux saturé s'écrit, sous forme différentielle

$$\vec{v} = - K \overrightarrow{\text{grad}}\, \Phi .$$

où

— v est le flux macroscopique, égal au volume d'eau écoulé par unité de temps et par unité de section droite du milieu ; v a les dimensions LT^{-1}, il est parfois nommé vitesse de Darcy ;

— Φ est le potentiel total ;

— K est la conductivité hydraulique. L'unité de K dépend de l'unité retenue pour le potentiel (voir annexe I). Dans la suite de l'exposé, on retiendra les dimensions LT^{-1} ;

K est un tenseur du second ordre symétrique, qui se réduit à un coefficient unique dans le cas d'un milieu poreux isotrope ;

K dépend à la fois du milieu poreux et du liquide ; lorsque les propriétés du liquide ne sont pas modifiées par le solide, on décompose K sous la forme

$$K = \frac{k \rho g}{\eta}$$

où

— k est la perméabilité intrinsèque, caractéristique du milieu poreux (dimensions L^2) ;

— ρ est la masse volumique du liquide ;

— g est l'accélération de la pesanteur ;

— η est la viscosité du liquide ($ML^{-1}\ T^{-1}$), encore appelée viscosité dynamique.

On a ultérieurement vérifié, par voie expérimentale, que la loi de Darcy peut décrire l'écoulement dans un milieu poreux non saturé, à condition de faire varier K en fonction de la teneur en eau ; l'expression la plus courante de cette dernière est la teneur en eau volumique θ, d'où la loi de Darcy généralisée

$$\vec{v} = - K (\theta) \overrightarrow{\text{grad}}\, \Phi \qquad (1)$$

K peut également être présenté comme une fonction du potentiel matriciel ; mais, à une valeur fixée de celui-ci correspondent différentes valeurs de K, selon l'histoire hydrique du milieu. C'est le phénomène d'hystérésis. L'hystérésis de la relation K (θ) est moins marquée, donc plus difficile à mettre en évidence ; c'est la raison pour laquelle il est généralement admis que cette relation est unique.

(Remarque : le potentiel matriciel de l'eau dans un sol non saturé a des valeurs négatives, compte tenu du potentiel pris comme référence ; on considère fréquemment sa valeur absolue, appelée succion ou tension de l'eau ; dans la suite du texte, on les désignera par la lettre ψ.)

La validité de la loi de Darcy est liée aux conditions suivantes :

— les dimensions du milieu poreux pour lequel K est défini sont suffisamment

grandes par rapport à la taille des pores pour qu'on puisse admettre qu'il est macroscopiquement homogène,

— le fluide étudié est un fluide visqueux,

— la vitesse d'écoulement reste inférieure à une limite au-delà de laquelle l'écoulement n'est plus laminaire. L'écoulement de l'eau dans les sols remplit en général cette condition.

— la température est constante.

Par ailleurs, l'exposé qui suit sera limité au cas des fluides incompressibles et des milieux non déformables ; la loi de Darcy, sous une forme modifiée, permet en principe de décrire l'écoulement dans d'autres cas (Philip, 1970), mais le formalisme, plus compliqué, a été moins développé.

Lorsque la teneur en eau varie dans l'espace et dans le temps, on introduit la loi de conservation de la masse qui s'écrit, dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, dans la direction des x

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial x}$$

ou, en exprimant v par l'expression (1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) .$$

La résolution de cette équation différentielle, suivant les conditions initiales et limites, permet de prévoir l'humectation du sol et son dessèchement. Au préalable on doit connaître les fonctions $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$. La relation $K(\theta)$, en particulier, est mesurée (Klute, 1972) ou déduite d'autres caractéristiques du milieu, quand c'est possible.

Philip (1972) insiste sur la nécessité de distinguer les niveaux d'étude de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux.

L'écoulement macroscopique est caractérisé par la loi de Darcy, loi phénoménologique, établie empiriquement, qui ne fait aucune hypothèse sur la structure interne du milieu poreux. Elle ne donne aucune information sur la distribution des vitesses microscopiques (à l'intérieur des pores).

Si l'on pouvait décrire de façon précise la géométrie de l'espace poral, on pourrait en principe obtenir ces informations par résolution des équations de Navier-Stockes, soumises aux conditions correspondantes. Cette résolution n'est possible que dans les cas où la géométrie du réseau d'écoulement est simple. Une solution particulière à laquelle il est souvent fait référence est la loi de Poiseuille ; celle-ci donne la vitesse d'écoulement laminaire, permanent, d'un liquide visqueux dans un tube cylindrique de rayon r, sous l'action d'une différence de potentiel $d\Phi$

$$u = - \frac{r^2}{8 \eta} \frac{d\Phi}{dx} .$$

L'analogie entre la loi de Darcy et la loi de Poiseuille est donc uniquement formelle ; la première décrit l'écoulement au niveau macroscopique, la seconde au niveau microscopique.

Bien entendu, ces deux niveaux ne sont pas indépendants. La vitesse macroscopique définie par la loi de Darcy est fonction de la distribution des vitesses microsco-

piques, qui varient de point en point de l'espace poral en raison des variations de forme, taille, orientation des pores.

Si l'on veut comprendre les phénomènes d'écoulement dans un milieu poreux, il semble donc utile de rechercher des relations entre les caractéristiques macroscopiques de l'écoulement (dans le cas présent, fonction $K(\theta)$) et les caractéristiques géométriques de l'espace poral qui influencent l'écoulement au niveau microscopique.

Les résultats des travaux publiés seront regroupés dans deux chapitres correspondant à deux types d'approche différents.

Dans un premier cas, on établit empiriquement des corrélations entre K et certains paramètres physiques du milieu poreux.

Dans le second cas, on recherche des modèles de milieux poreux auxquels on peut appliquer les lois classiques de l'écoulement des fluides visqueux, les conditions initiales et limites étant alors bien définies.

Les travaux relatifs aux sols à forte teneur en argile ne sont pas présentés dans cet exposé; la validité de la loi de Darcy dans ces cas-là étant très controversée, il a semblé hasardeux d'interpréter ces résultats.

Les articles analysés étant essentiellement d'origine anglo-saxonne les sols seront parfois caractérisés par leur classe texturale définie par le triangle de texture donné en annexe II.

II. — Corrélations empiriques entre la conductivité hydraulique et les paramètres physiques du milieu poreux

Un certain nombre d'observations expérimentales mettent en évidence l'effet direct ou indirect des propriétés géométriques des milieux poreux sur la circulation de l'eau dans ces milieux. Lorsque les observations sont assez nombreuses, elles permettent l'établissement de corrélations.

1. — *Conductivité du sol saturé KS*

1.1. — *Corrélations avec la distribution de taille des particules constitutives.*

La distribution des tailles des particules constituant le milieu poreux est caractérisée par des paramètres de position (médiane, moyenne), de dispersion, de dissymétrie. Mash et Denny (1966) établissent des corrélations entre ces paramètres et la conductivité saturée d'assemblages de grains de sable, dont la forme n'est pas précisée mais varie peu d'un assemblage à l'autre ; mais ils observent que, dès qu'ils étudient des sables de formes différentes ou légèrement consolidés, les corrélations ne leur permettent pas de prévoir KS.

Lorsque la distribution est étalée, on définit des classes de tailles de particules. Gumbs (1975) établit, à partir d'échantillons prélevés dans une même série de sols, une corrélation positive entre KS et la teneur en sable grossier (0,2-2 mm), une liaison négative avec la teneur en éléments plus fins (0,02-0,2 mm, 2-20 μ). A condition qu'il se limite à cette série de sols, ces corrélations lui permettent de prévoir KS avec une précision suffisante pour l'étude de dispositifs de drainage.

Dans une situation différente, des corrélations différentes seront obtenues. Ainsi,

Bonnell (1976), étudiant des argiles à galets, établit des corrélations négatives avec la teneur en sable moyen et fin, mais positives avec les fractions plus fines (limon moyen). Il suppose, pour expliquer ce résultat qui peut paraître surprenant, que le limon moyen favorise le développement d'une structure prismatique.

Ces observations montrent nettement qu'il n'existe pas de corrélation unique entre KS et la distribution de taille des particules ; celle-ci n'influence KS que de façon indirecte, dans la mesure où elle favorise un type de structure. Prise isolément, c'est donc une donnée insuffisante pour prévoir KS.

1.2. — *Corrélations multiples KS-paramètres physiques du milieu poreux* (densité apparente, taille d'agrégats...).

Diebold (1954) analyse deux cents échantillons de sol de « texture moyenne » qu'il regroupe en classes de densité apparente, pourcentage de gros pores, de matière organique et de limon ; en considérant simultanément tous ces paramètres, il prévoit la classe de KS qui caractérise le sol étudié ; il peut ainsi définir les zones ou horizons qui limitent l'alimentation en eau des plantes, les zones où l'amélioration du profil par désalinisation est possible. Il ne dégage pas de valeurs limites précises mais des tendances qui lui permettent d'intervenir de façon efficace.

O'Neal (1952) entreprend le même type d'étude sur des sols structurés, en considérant un plus grand nombre de paramètres. Chacun de ces paramètres doit être considéré en relation avec les autres pour prévoir la classe de KS ; les applications de cette étude ne sont pas précisées.

Ce type d'approche nécessite la mise en œuvre de moyens importants : prélèvement d'un grand nombre d'échantillons, détermination de plusieurs paramètres sur chacun, analyse statistique complexe, mais des études plus légères ne permettraient aucune prévision. Nielsen *et al.* (1973) font ainsi remarquer que l'absence de corrélation entre les paramètres hydrodynamiques et la densité apparente ou la taille des particules fait que de nombreuses données cartographiques ne peuvent être exploitées pour prévoir le mouvement ou la rétention de l'eau ; mais ils ne précisent pas les déterminations complémentaires qui devraient être faites.

De plus, les corrélations qui sont établies ne sont valables qu'à l'intérieur des limites d'étude (série de sols, famille de sols...), ce qui n'enlève rien à l'intérêt qu'elles présentent sur le plan pratique.

Elles fournissent rarement des éléments d'explication et de compréhension de l'écoulement de l'eau, sinon de façon indirecte et partielle.

2. — *Conductivité du sol non saturé, K*

Les résultats précédents ne présentent d'intérêt que dans les cas où le sol est saturé ; en fait, la majorité des phénomènes d'écoulement concernent le sol non saturé, ce qui nécessite l'étude de K.

On observe que, lorsque la teneur en eau d'un milieu poreux diminue, la conductivité hydraulique diminue plus que proportionnellement à θ ; en effet, lorsque le milieu se désature, le volume réellement disponible pour l'écoulement diminue ; ce sont les plus gros pores qui se vident les premiers, la circulation étant alors limitée aux pores plus petits. Or, d'après la loi de Poiseuille, la vitesse d'écoulement est pro-

portionnelle au carré de la taille des pores. De plus, les pores remplis d'air introduisent des discontinuités dans le chemin d'écoulement, qui devient plus tortueux.

Il semble difficile d'établir des corrélations entre K et les paramètres géométriques d'un milieu poreux. Quelques tentatives, dans le domaine de la recherche pétrolière, se sont avérées peu fructueuses (Scheidegger, 1974). Dans le domaine agronomique, des observations ont été faites sur des empilements d'agrégats poreux, afin d'étudier l'effet de la taille des agrégats.

La courbe de rétention de l'eau par un massif d'agrégats présente deux paliers (fig. 1). De 0 à ψ_1, la variation de tension est insuffisante pour vider les pores, le massif reste saturé. Lorsque $\psi = \psi_1$, l'air chasse l'eau des pores interagrégats, les agré-

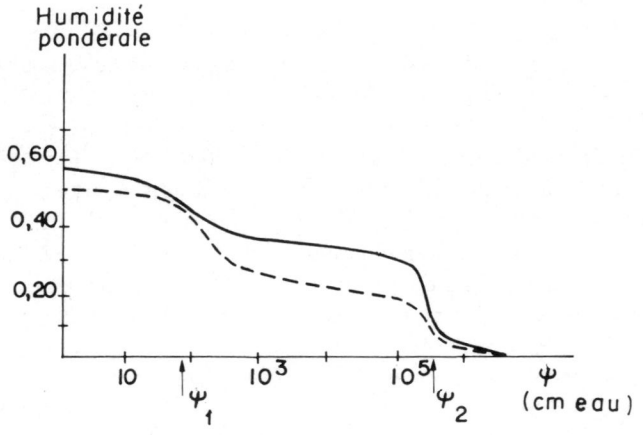


FIG. 1. — *Relation entre l'humidité pondérale* (g eau/g terre sèche) *et la succion matricielle de deux types de sols agrégés* (d'après Sharma et Uehara, 1968) (— Wahiawa soil, - - - Molokai soil).

Moisture release curves of the Wahiawa and Molokai aggregated soils.

gats eux-mêmes restant pratiquement saturés jusqu'à ce que la tension atteigne la valeur d'entrée d'air dans les pores intraagrégats, ψ_2. Ces deux paliers et les valeurs ψ_1 et ψ_2 sont d'autant plus nets que les distributions de tailles des pores interagrégats et intraagrégats ne se recoupent pas. La valeur de ψ_1 augmente lorsque la taille des agrégats constituant le milieu diminue (fig. 2).

La relation $K(\psi)$ présente la même allure pour les faibles valeurs de ψ (fig. 2). Lorsque les pores interagrégats se vident, K diminue brusquement pour atteindre des valeurs faibles lorsque l'eau est retenue principalement dans les agrégats (Sharma et Uehara, 1968). Dans les cas extrêmes, la continuité des chemins d'écoulement peut être rompue après vidange des gros pores, K devient alors négligeable (Amemiya, 1975).

Lorsque l'écoulement subsiste, Amemiya note que K, dans la représentation $K(\theta)$ cette fois, est influencée par la taille des agrégats si celle-ci affecte la relation $\psi(\theta)$, mais il ne propose pas d'explication. Il semble que la continuité des chemins d'écoulement soit un facteur essentiel.

On peut reprendre, pour illustrer ce phénomène, le schéma proposé par Gras (1971) dans son étude de l'infiltration dans un milieu hétérogène (élément grossier

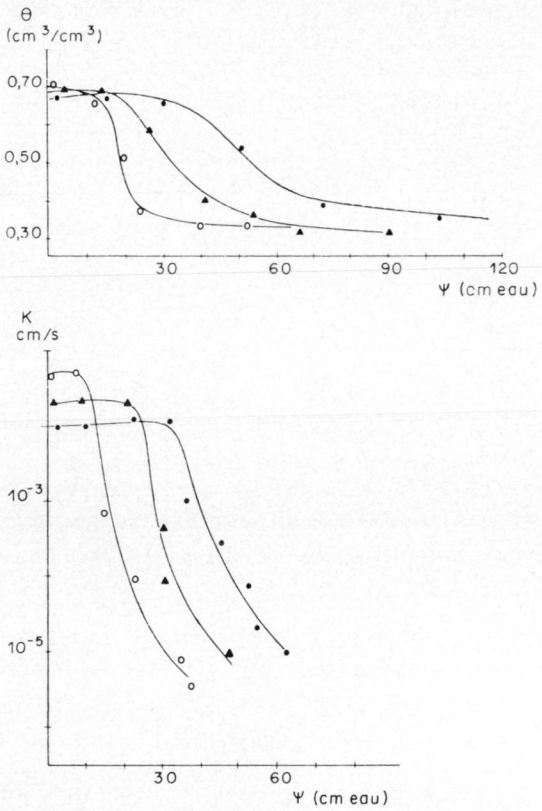


FIG. 2. — *Evolution de la teneur en eau volumique* θ *et de la conductivité hydraulique K en fonction de la succion matricielle, pour des empilements d'agrégats de tailles différentes provenant d'un même sol* (Wahiawa soil) (d'après Sharma et Uehara, 1968).

Volumetric soil water content θ *and capillary conductivity K as a function of soil moisture tension, for water stable aggregates of the Wahiawa soil* (from Sharma and Uehara, 1968).

●——● 60-140 mesh
▲——▲ 40- 60 mesh
○——○ 20- 40 mesh

noyé dans un massif de sable fin). Lorsque le milieu est désaturé, l'eau peut passer d'un point A à un point B de l'espace poral si la tension est plus élevée en B qu'en A ; or, la tension de l'eau dans un pore est fonction de la taille du pore et de son degré de remplissage (on suppose la mouillabilité identique dans tous les pores).

Si les populations de rayons des pores intraagrégats et interagrégats diffèrent par leur valeur moyenne r_{m_1} et r_{m_2} respectivement, une partie des pores ne participera pas à l'écoulement de l'eau vers l'extérieur des agrégats (zone hachurée sur la fig. 3) ; ce sont les pores intraagrégats plus petits que les pores interagrégats, et les pores interagrégats plus gros que les pores intraagrégats. A la limite, lorsque les gammes de variation des rayons de pores ne se recouvrent pas, aucun passage d'eau hors de l'agrégat n'est possible sous l'influence de la succion. On remarquera qu'il

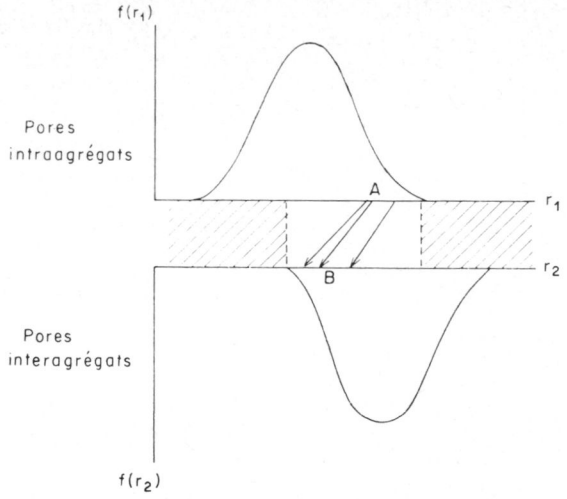


FIG. 3. — *Passage de l'eau des pores intraagrégats vers les pores interagrégats* (d'après Gras, 1971).
Water transfer from intraaggregates pores to interaggregates pores (from Gras, 1971).

s'agit là d'un cas tout à fait théorique : dans le cas des sols, l'existence de plans de contacts plus ou moins importants entre les agrégats favorise le passage de l'eau entre agrégats.

3. — *Conclusion*

Les résultats présentés dans ce paragraphe montrent qu'il est possible d'établir des corrélations entre la conductivité hydraulique et des caractéristiques texturales ou structurales du milieu poreux.

Ce type d'approche présente l'intérêt et les limites de toute corrélation : on peut prévoir les valeurs de K pour des applications agronomiques, mais à l'intérieur de limites précises. Encore ne s'agit-il que des valeurs de K saturé. On ne peut en déduire aucun élément d'explication général.

L'étude de la conductivité des milieux non saturés montre l'importance de la continuité des chemins d'écoulement, donnée qui sera prise en considération dans le deuxième type d'approche présenté.

III. — Modèles capillaires

1. — *Présentation générale. Notion de modèle de fonctionnement*

La méthode la plus simple, compte tenu de la complexité de la géométrie de l'espace poral, pour établir de façon théorique les relations recherchées, consiste à représenter le milieu poreux par des modèles auxquels on peut appliquer les lois d'écoulement des fluides visqueux. La comparaison des résultats obtenus par calcul et par expérience montre quel modèle permet de prévoir le fonctionnement hydrodynamique du milieu poreux.

Etant donnée l'analogie formelle entre la loi de Darcy et la loi de Poiseuille, les modèles les plus couramment utilisés consistent en un assemblage de capillaires cylindriques dont les caractéristiques sont reliées aux caractéristiques géométriques du milieu poreux (porosité ε, $\psi(\theta)$...). L'observation préliminaire du déplacement d'un liquide par un gaz dans un capillaire, avec un angle de contact nul, montre que la pression capillaire est indépendante de la vitesse de l'interface ; ceci justifie l'utilisation d'un modèle basé sur la loi de Poiseuille pour prévoir l'écoulement dans un milieu non saturé (Scheidegger, 1974).

1.1. *Hypothèse de Dupuit-Forchheimer.*

La loi de Poiseuille définit la vitesse d'écoulement dans les capillaires eux-mêmes, qui constituent les pores du modèle. On doit donc comparer la vitesse calculée par le modèle à la vitesse dans les pores du milieu poreux ; en fait, cette dernière n'a pas une valeur bien définie, puisque la vitesse est variable d'un pore à l'autre et à l'intérieur même d'un pore, sa distribution n'étant pas connue. On est ainsi amené à définir une vitesse moyenne v' dans les pores, qui sera supérieure à la « vitesse de Darcy » v, puisque le volume réellement utile pour l'écoulement est inférieur au volume de référence pris pour calculer la vitesse de Darcy. L'hypothèse généralement admise pour relier ces deux vitesses est l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer

$$v' = \frac{v}{\varepsilon}.$$

Une autre formulation de cette hypothèse concerne l'aire de la section réelle d'écoulement A'

$$A' = A.\varepsilon \qquad (\text{puisque } v'.A' = v.A).$$

Cette hypothèse a été généralisée à l'écoulement dans un sol non saturé, en remplaçant ε par θ.

1.2. *Calcul de la perméabilité k.*

Si un faisceau de capillaires peut être caractérisé par un rayon moyen R, la vitesse d'écoulement sous l'action d'un gradient de potentiel est d'après la loi de Poiseuille

$$u = -\frac{R^2}{8\eta}\frac{d\Phi}{dx} \tag{2}$$

Le même gradient de potentiel (Φ ayant les dimensions $ML^{-1}T^{-2}$) produit dans le milieu poreux un écoulement de vitesse

$$v' = -\frac{k}{\varepsilon\eta}\frac{d\Phi}{dx} \tag{3}$$

L'identification des équations (2) et (3) donne la formulation de la perméabilité

$$k = \frac{\varepsilon}{8} R^2$$

d'où la conductivité hydraulique $K = \dfrac{\varepsilon \rho g}{8\eta} R^2$.

Les différences entre les modèles reposent sur le mode de calcul de R à partir des caractéristiques du milieu poreux.

2. — *Théorie du rayon hydraulique. Formule de Kozeny-Carman*

On définit le « rayon hydraulique » du milieu poreux comme le rapport du volume des pores à leur surface

$$R = \frac{\varepsilon}{S_v(1 - \varepsilon)}.$$

Pour un volume apparent unitaire, on considère que ε représente le volume des pores. S_v est la surface par unité de volume réel des particules.

Ceci revient à associer au milieu poreux un capillaire de rayon R. La perméabilité saturée peut ainsi être calculée

$$k = \frac{1}{8} \frac{\varepsilon^3}{S_v^2(1 - \varepsilon)^2}.$$

Cette formule a été établie de façon indépendante par Kozeny (1927) et Fair et Hatch (1933). Carman (1937) l'a ultérieurement modifiée pour la rendre plus générale :

— lorsque les particules constitutives du milieu ne sont pas sphériques, le dénominateur 8 doit être remplacé par une constante C appelée facteur de forme.

— l'ajustement des valeurs calculées aux valeurs mesurées est meilleur si on introduit au dénominateur un facteur de tortuosité T, qui rend compte de l'allongement du chemin d'écoulement.

D'où la formule plus générale, appelée formule de Kozeny-Carman

$$k = \frac{1}{CT} \frac{\varepsilon^3}{S_v^2(1 - \varepsilon)^2}.$$

L'application de cette formule est limitée aux conditions suivantes :

— tous les pores du milieu sont conducteurs,
— les pores sont distribués au hasard,
— la distribution des tailles de pores est peu étalée,
— la porosité n'est pas trop élevée (40-50 p. 100).

Un certain nombre d'auteurs ont tenté de relier la constante de Kozeny-Carman, CT, à des caractéristiques physiques du milieu poreux. Carman (1935) estime que, pour tous les milieux constitués de grains de diamètre supérieur à 10 μ, on peut attribuer en moyenne aux paramètres C et T les valeurs 2,5 et 2 respectivement. Wyllie *et al.* (1950, 1955) proposent de déduire le facteur de tortuosité T de mesures du facteur de formation F (F est le rapport entre la résistance du milieu saturé en électrolyte et la résistance de l'électrolyte occupant le même volume apparent). Mais la relation entre T et F n'est pas bien connue. Selon les auteurs

$$T = \frac{F}{\varepsilon} \quad \text{ou} \quad T = \left(\frac{F}{\varepsilon}\right)^2.$$

En fait, il est pratiquement impossible de contrôler la validité de l'équation de Kozeny-

Carman : il faudrait pour cela déterminer de façon indépendante les trois paramètres S_v, C, T, ce qui impliquerait que T soit bien défini. La plupart du temps, on mesure S_v, ε, et on ajuste *a posteriori* la constante CT.

De toutes façons, l'ajustement est impossible dans le cas de milieux à structure fragmentaire ; les pores structuraux modifient de façon négligeable ε et S_v alors qu'ils modifient k de façon importante. Dans le cas de milieux argileux, Carman (1939) propose de remplacer la porosité ε par une porosité réduite ε_1 qui tient compte de la fraction de l'eau qui est pratiquement immobile, au contact des surfaces ; mais là encore, ε_1 est déterminé *a posteriori*.

Lorsque le milieu poreux n'est pas saturé en eau, on propose de remplacer ε par θ, le facteur T devant alors être modifié. Physiquement, cette substitution n'a aucun sens puisqu'elle suppose l'écoulement simultané de l'air et de l'eau dans le capillaire de rayon R associé au milieu poreux, l'eau circulant sur les parois du tube. L'application de la formule de Kozeny-Carman doit donc être limitée au calcul de la conductivité saturée des milieux poreux constitués de grains de taille uniforme et non structurés.

Lorsque la distribution de taille des pores devient plus étalée, ce modèle ne permet aucune prévision ; on doit alors recourir à d'autres modèles.

3. — *Faisceau de capillaires parallèles, de rayons différents*

Le modèle est ici constitué par un faisceau de capillaires cylindriques, parallèles, de rayons différents. La distribution de ces rayons, f(r), est déduite de la relation $\psi(\theta)$ du milieu poreux par application de la loi de Laplace

$$r = \frac{\gamma \cos \alpha}{\psi}$$

où γ est la tension superficielle

α est l'angle de raccordement eau-solide, supposé nul dans le cas où le milieu poreux se désature.

La perméabilité correspondant aux tubes de rayons compris entre r et $r + dr$ est calculée par la formule de Kozeny-Carman

$$dk = \frac{\varepsilon}{CT} r^2 f(r)\, dr .$$

Pour une teneur en eau donnée $\left(\text{correspondant au degré de saturation } S = \frac{\theta}{\varepsilon}\right)$, la perméabilité est calculée par intégration entre le rayon du plus petit pore conducteur et le rayon du plus gros pore qui reste saturé à cette teneur en eau (Brooks et Corey, 1966).

$$k(S) = \frac{\varepsilon S}{CT} \int_0^r r^2 f(r)\, dr \qquad (4)$$

ou bien, en remplaçant r par la loi de Laplace

$$k(S) = \frac{\varepsilon}{CT} \gamma^2 \int_0^S \frac{dS}{\psi^2} .$$

La perméabilité ainsi calculée est proportionnelle à la moyenne des carrés des rayons ($k = a\overline{R^2}$), à la différence du cas précédent, où $k = a(\overline{R})^2$. La première formulation est plus satisfaisante puisqu'elle tient compte de la contribution de chaque classe de pores au débit d'écoulement, conformément à la loi de Poiseuille.

A la différence du modèle précédent, celui-ci rend mieux compte des conditions de désaturation du milieu poreux : ce sont les plus gros pores qui se vident les premiers, l'écoulement étant limité aux plus petits pores qui restent saturés, ce que traduit la variation de la borne supérieure d'intégration de la formule (4).

Ce modèle peut donc être appliqué à des milieux poreux dont la distribution des tailles de pores est étalée. Le milieu doit être indéformable, si l'on veut déduire f(r) de la relation $\psi(\theta)$.

Dans certains cas, on définit un degré de saturation résiduelle S_r, en-dessous duquel la perméabilité devient nulle. Le degré de saturation est alors exprimé sous la forme

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r}$$

dite degré de saturation effective.

Pour ce type de modèle, la perméabilité est souvent exprimée en terme de perméabilité relative,

$$k_r = \frac{k(S)}{k(1)} .$$

Burdine (1953) admet que les valeurs de C sont identiques quel que soit le degré de saturation, et montre que le rapport des tortuosités $\frac{T(1)}{T(S)} = S_e^2$; cette relation a été vérifiée ultérieurement par une méthode analytique, par Wyllie et Gardner (1958).

La perméabilité relative s'exprime alors sous la forme

$$k_r = S_e^2 \frac{\int_0^S \frac{\overline{dS}}{\overline{\psi^2}}}{\int_0^1 \frac{dS}{\overline{\psi^2}}} \qquad (5)$$

qui permet de calculer la perméabilité pour tout S, à condition de mesurer la perméabilité saturée et la relation $S(\psi)$.

Laliberte, Brooks et Corey (1968), en particulier, proposent une méthode d'intégration analytique, lorsqu'il est possible d'exprimer la relation $S_e(\psi)$ sous la forme

$$\begin{cases} S_e = 1 & , \psi < \psi_a \\ S_e = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{\lambda} & , \psi \geqslant \psi_a \end{cases}$$

où ψ_a est la tension d'entrée d'air du milieu poreux. Remplaçant dans l'expression (5)

$$\begin{cases} k_r = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{2+3\lambda} & , \psi \geqslant \psi_a \\ k_r = 1 & , \psi < \psi_a . \end{cases}$$

C'est sous cette forme que ce modèle a été le plus fréquemment utilisé en physique du sol. Son utilisation suppose qu'on puisse définir une tension d'entrée d'air, ce qui n'est vraiment possible que lorsque la relation $\theta(\psi)$ présente un palier pour les faibles tensions. Lorsque ce n'est pas le cas, on observe, dans la représentation $K(\theta)$, une divergence entre les valeurs mesurées et calculées au voisinage de la saturation (Bruce, 1972 ; Brust et Van Bavel, 1968). Pour les teneurs en eau plus faibles, l'accord n'est jamais satisfaisant sur toute la gamme.

Dans tous les cas, se pose le problème de l'évaluation de S_r, qui n'a pas une signification physique bien définie. On retient pour S_r la valeur qui permet le meilleur ajustement linéaire de log S_e en fonction de ψ (Boreli et Vachaud, 1966 ; Laliberte, Brooks et Corey, 1968). Sharma *et al.* (1969) suggèrent que, dans le cas de milieux agrégés, la teneur en eau résiduelle est égale à la teneur en eau dans les agrégats.

En fait ce type de modèle a été peu utilisé. Les recherches se sont orientées vers des modifications complémentaires du modèle capillaire.

4. — *Faisceau de capillaires en série*

4.1. *Présentation du modèle.*

On fait ici varier le diamètre de chaque capillaire le long du chemin d'écoulement qui relie les deux faces du modèle, tenant compte de la variation de taille des pores à la fois dans les directions perpendiculaires et parallèles à la direction macroscopique d'écoulement.

L'hypothèse principale est que l'écoulement est contrôlé par l'aire de section droite des étranglements qui relient les pores. Pour calculer celle-ci, on considère un modèle du type précédent que l'on sectionne suivant un plan perpendiculaire à l'axe des capillaires (fig. 4). La distribution des tailles des capillaires, identique dans chaque face exposée, est déduite de la relation $\psi(\theta)$ comme précédemment. Les deux faces sont ensuite réassemblées, de façon aléatoire. On calcule la distribution des tailles des connexions dans ce plan, en tenant compte de la probabilité d'ajustement de deux pores situés dans chaque face.

Une autre hypothèse consiste à négliger l'écoulement entre deux séries de pores parallèles.

Les conditions d'application de ce modèle sont les suivantes :

— le milieu est isotrope,
— l'espace poral est continu,
— il n'existe pas de chemin d'écoulement préférentiel,
— les tailles des pores sont distribuées au hasard,
— le milieu est indéformable.

Millington et Quirk (1964) proposent de généraliser le modèle à des milieux poreux qui ne satisfont pas toutes ces conditions (par exemple, des milieux légèrement consolidés), en utilisant les résultats de mesure du facteur de formation pour caractériser la continuité de l'espace poral ; mais ils présentent trop peu de résultats expérimentaux pour justifier l'intérêt de cette proposition.

Childs et Collis-George (1950) proposent la première formulation mathématique de ce modèle. Un traitement formellement différent, mais identique sur le principe est ultérieurement proposé par Marshall (1958), puis Millington et Quirk (1960).

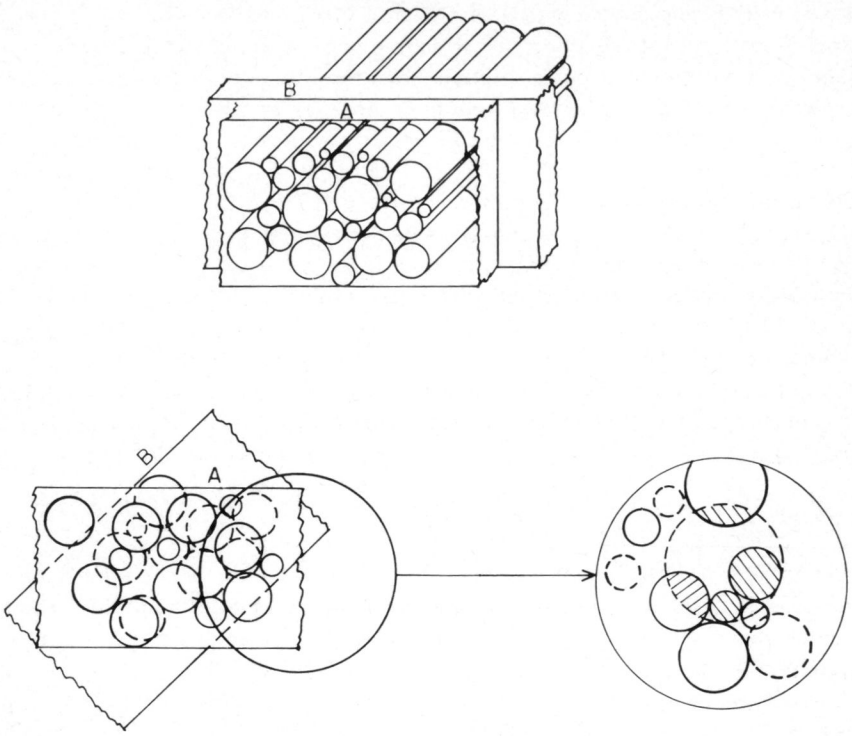


FIG. 4. — *Schéma du modèle de capillaires en série, montrant la distribution des connexions.*

Schematic representation of the series-parallel model, showing the size distribution of pore-connections.

Formule de Childs et Collis-George.

Si f(r) est la distribution des tailles de pores déduite de $\psi(\theta)$, la conductivité hydraulique est donnée par

$$K(\theta) = M \frac{\rho g}{\eta} \sum_{\delta=0}^{\delta=r} \sum_{\sigma=0}^{\sigma=r} \sigma^2 f(\sigma)\, d\delta\, f(\sigma)\, d\sigma$$

où r est le rayon du pore le plus grand qui reste saturé à la teneur en eau pour laquelle K est calculé.

M est un facteur d'ajustement, égal au rapport entre la valeur mesurée et la valeur calculée de la conductivité du sol saturé.

Formule de Marshall. Formule de Millington et Quirk.

Pour une teneur en eau donnée θ, l'aire moyenne de section droite des connexions entre les pores saturés des faces A et B (fig. 4) est établie par Marshall :

$$AS = \frac{\theta \pi}{n^2} \sum_{j=i}^{n} (2j + 1 - 2i)\, r_j^2$$

Si on l'assimile à l'aire de section droite d'un capillaire de rayon R tel $R^2 = \frac{AS}{\pi}$, on en déduit l'expression de la conductivité

$$K(\theta) = \frac{\rho g}{8 \eta} \frac{\theta^2}{n^2} \sum_{j=i}^{n} (2j + 1 - 2i)\, r_j^2$$

— La série des r_j est la série des rayons moyens de n classes de pores qui divisent le volume poral en n volumes égaux (pour un milieu poreux de volume apparent unitaire, ε est en effet assimilable à un volume). $r_1 > r_2 > \ldots > r_n$. r_i est le rayon du plus gros pore qui reste saturé à la teneur en eau considérée.

Les valeurs successives de r_j sont déduites de la relation $\psi(\theta)$; $r_j^2 = 4\gamma^2 \psi_j^{-2}$ (l'axe des θ est divisé en n parties égales, auxquelles correspondent n valeurs de ψ_j).

Dans la pratique, la sommation sur les j est arrêtée à une valeur m, égale au nombre de classes de pores entre $\theta = \varepsilon$ et $\theta = \theta_r$, teneur en eau résiduelle (en effet, les classes de rang compris entre m et n ne sont pas conductrices).

— L'exposant 2 de θ, qui tient compte de la probabilité de continuité des différentes classes de pores, a été ultérieurement remplacé par d'autres valeurs, que l'on peut introduire par le biais d'un paramètre p. D'où la formulation plus générale

$$K(\theta) = \frac{\rho g \gamma^2}{2 \eta} \frac{\theta^p}{n^2} \sum_{j=i}^{m} (2j + 1 - 2i)\, \psi_j^{-2}.$$

Dans le modèle de Marshall, $p = 2$; lorsque le milieu se désature, n est en fait remplacé par le nombre de classes de pores qui restent saturées à la teneur en eau considérée.

Dans le modèle de Millington et Quirk, $p = \frac{4}{3}$, n a le sens défini initialement, quelle que soit la valeur de θ. Les auteurs pensent ainsi rendre compte de l'augmentation de la tortuosité due à la désaturation du milieu.

Ultérieurement, différentes combinaisons de p et n ont été proposées.

4.2. *Vérifications expérimentales de la validité du modèle.*

De tous les modèles capillaires, c'est celui-ci qui a été le plus fréquemment employé pour prévoir la conductivité hydraulique des sols, en particulier sous sa deuxième forme (Marshall, Millington et Quirk). C'est la raison pour laquelle ces résultats seront analysés de façon plus détaillée.

On peut considérer que, lorsque les relations $\psi(\theta)$ et $K(\theta)$ sont mesurées sur des milieux présentant la même texture et la même structure, ou sur un même milieu dans le cas le plus favorable, la comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de K constitue un test de la validité du modèle. L'interprétation des expériences où $\psi(\theta)$ et $K(\theta)$ sont mesurés sur des milieux différents (par exemple $\psi(\theta)$ est mesuré sur des échantillons non remaniés, $K(\theta)$ est mesuré *in situ*) est plus délicate.

4.21. *Influence de différents paramètres de calcul sur la relation $K(\theta)$ calculée.*

a) *Facteur d'ajustement.*

Les auteurs des modèles, étudiant des milieux inertes, prévoyaient correctement les valeurs de K ; mais l'extension du modèle à des milieux de texture plus fine

a montré que les valeurs de K calculées sont toujours trop élevées (Nielsen *et al.*, 1960 ; Jackson *et al.*, 1965).

L'introduction d'un facteur d'ajustement, égal au rapport entre la valeur mesurée et la valeur calculée de K, pour une teneur en eau donnée, permet de réduire l'écart. Les valeurs de ce facteur sont d'autant plus faibles que la texture est plus fine ; elles varient de 0,5 à 0,001. Kunze *et al.* (1968) notent qu'il est impossible de relier explicitement le facteur d'ajustement à certaines caractéristiques du fluide ou du milieu poreux qui peuvent expliquer qualitativement les écarts observés (surface spécifique des particules-augmentation de la viscosité du fluide à proximité du solide...).

Les courbes $K(\theta)$ mesurée et calculée ayant rarement la même forme sur une gamme de θ étendue, l'ajustement complet nécessiterait plusieurs facteurs d'ajustement. La majorité des auteurs conseillent de calculer le facteur d'ajustement pour la saturation (Jackson *et al.*, 1965 ; Brust *et al.*, 1968 ; Bruce, 1972). D'autres obtiennent un meilleur ajustement pour une teneur en eau inférieure à la saturation (Roulier *et al.*, 1972). La méthode de calcul de $K(\theta)$ perd cependant une grande partie de son intérêt si l'on doit simultanément mesurer K sur le milieu non saturé.

b) *Valeur de* p. *Définition de* n.

Les valeurs attribuées à p varient d'un auteur à l'autre, de même que le sens donné à n (nombre total de classes de pores ou bien nombre de classes de pores qui restent saturées), sans que les raisons en soient toujours précisées. Kunze *et al.* (1968) déterminent par ajustement la meilleure valeur de p qu'ils trouvent être 1, dans le cas de milieux remaniés, de textures variées (billes de verre, silt loam, clay loam, clay). Green et Corey (1971), essayant différentes combinaisons de n et p, montrent que la forme de la courbe $K(\theta)$ n'est pas sensiblement modifiée (fig. 5) et concluent que les modèles introduits par Marshall puis Millington et Quirk sont équivalents.

c) *Valeur de* n.

Quelques auteurs ont recherché quel est le nombre optimal de classes de pores pour décrire $\psi(\theta)$ et la distribution des tailles de pores. Kunze *et al.* (1968) trouvent qu'au delà de la valeur 8, la pente de la courbe $K(\theta)$ calculée pour un massif de billes de verre est trop élevée. Par contre, Green *et al.* (1971) prétendent qu'on ne peut obtenir une représentation précise de $\psi(\theta)$ pour des valeurs de n inférieures à 10. Denning *et al.* (1974) proposent des valeurs différentes selon que le sol a une structure particulaire ou bien fragmentaire, et selon le degré de perméabilité dans ce dernier cas.

d) *Erreurs relatives à la détermination de* $\psi(\theta)$.

— *Erreur de troncature.*

La courbe $\psi(\theta)$ à partir de laquelle sont effectués les calculs est mesurée sur une gamme plus ou moins limitée selon les cas. Kunze *et al.* (1968) montrent que le fait de négliger la partie de la courbe $\psi(\theta)$ vers les faibles teneurs en eau entraîne un moins bon ajustement, principalement au voisinage de ces teneurs ; pour les plus fortes teneurs en eau, en effet, la contribution à la conductivité des classes de pores de petite taille est relativement moins importante. Les autres auteurs semblent ne pas se poser le problème.

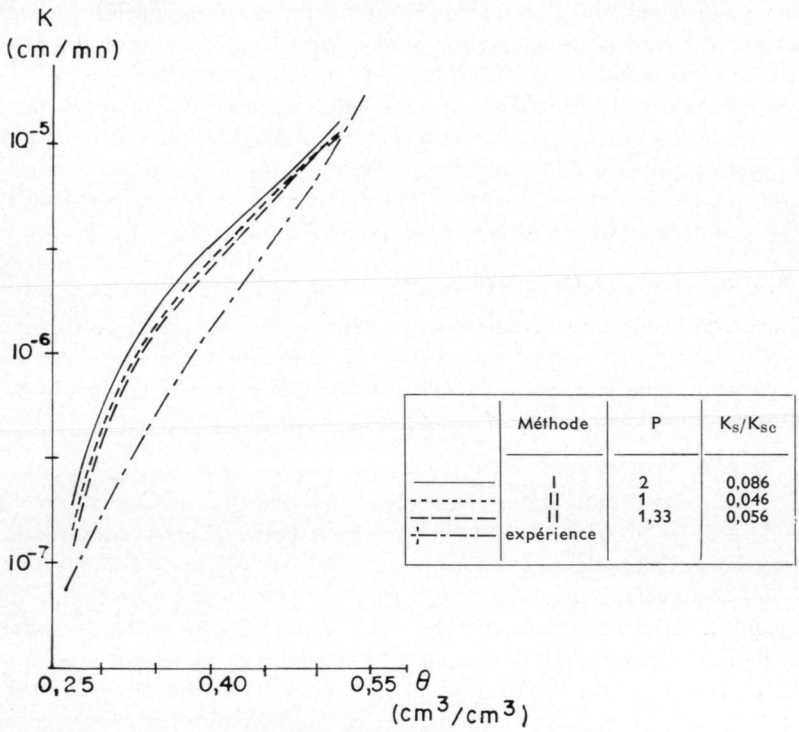


FIG. 5. — *Relation entre conductivité hydraulique et teneur en eau, calculée d'après différentes méthodes. Comparaison avec la relation mesurée pour « Ida silt loam »* (d'après Green et Corey, 1971).

Calculated hydraulic conductivities for Ida silt loam using three methods of computation compared with experimental data (from Green and Corey, 1971).

Méthode I : n est le nombre de classes de pores entre θ et 0.
n is the number of pore classes between θ and 0.
Méthode II : n est le nombre de classes de pores entre ε et 0.
n is the number of pore classes between ε and 0.
K_s/K_{sc} : est le facteur d'ajustement calculé à la saturation.
is the fitting factor calculated at saturation.

— *Variabilité de* $\psi(\theta)$.

L'incertitude sur la mesure de $\psi(\theta)$ et son influence sur le calcul de $K(\theta)$ sont rarement précisées. Stockton et Warrick (1971), étudiant une surface de 40 ha d'un sol de texture clay loam, observent qu'une variation de un écart-type par rapport à la courbe moyenne $\psi(\theta)$ entraîne une variation de 20 à 30 p. 100 de la conductivité calculée.

— *Hystérésis de la relation* $\psi(\theta)$.

Jackson *et al.* (1965) trouvent que les relations $K(\theta)$ calculées à partir des courbes $\psi(\theta)$ mesurées en humectation et en dessiccation sur un sable (50-500 μ) coïncident après ajustement à la valeur de K saturé. Par contre, Kunze *et al.* (1968), Green et Corey (1971), Bouma et Denning (1974) notent, sur des milieux de texture variée, des écarts qui peuvent atteindre un rapport de 10 entre les valeurs de K calculées pour une

même teneur en eau, dans l'un ou l'autre cas. Il semble donc préférable, selon que l'on veut prévoir K(θ) pour un cycle d'humectation ou de dessiccation, d'utiliser la relation ψ(θ) correspondante.

En conclusion, cette première série de résultats montre l'influence de certains paramètres de calcul sur la relation K(θ) calculée, mais il est difficile d'en déduire les valeurs précises que l'on doit retenir pour l'étude d'un milieu nouveau. Les articles publiés fournissent également quelques informations en ce qui concerne les types de milieux auxquels le modèle peut être appliqué.

4.22. *Conditions relatives au type de sol.*

Les paramètres de calcul étudiés étant différents d'un article à l'autre, les caractéristiques des sols étudiés n'étant pas toujours données de façon complète, il est difficile de définir précisément les limites d'application de ce modèle, à partir des résultats expérimentaux. On peut néanmoins dégager certaines tendances.

a) *Effet de la texture du sol.*

L'analyse des résultats obtenus sur des échantillons remaniés montre qu'il est possible de prévoir la relation K(θ) avec une précision suffisante, tant que la teneur en argile n'est pas trop élevée ; il n'est pas possible de définir une teneur limite, étant donné que l'origine des matériaux diffère selon les auteurs et que la composition granulométrique n'est pas toujours chiffrée. Seul, Bouma étudie de façon systématique l'effet de l'augmentation de la teneur en éléments fins, en mélangeant un sable à des quantités croissantes d'un sol (Bouma et Anderson, 1973) ou de gypse (Bouma et Denning, 1974). Dans les deux cas, il montre qu'au-delà d'un certain pourcentage en éléments fins, le modèle ne permet pas de prévoir l'allure de la conductivité mesurée (fig. 6).

Dans le cas de certains échantillons non remaniés (Bruce, 1972; Wesseling, 1974), la même conclusion est valable ; malheureusement, dans aucun de ces cas, la structure du milieu poreux n'est précisée.

b) *Effet de la structure.*

Sharma *et al.* (1969) proposent de modifier le modèle de calcul de K(θ) pour les milieux agrégés en remplaçant θ par (θ — θr), où θr est la teneur en eau résiduelle définie précédemment ; le rapport entre les valeurs de K calculé et K mesuré passe alors de 100 ou plus à 10 ou moins. Denning *et al.* (1974) montrent que le modèle ne permet pas le calcul de K pour les sols agrégés, même aux fortes teneurs en eau. En fait, l'observation de lames minces montre que les pores interagrégats dans lesquels l'eau circule, pour les teneurs en eau étudiées, ont la forme de fentes, plus que des tubes cylindriques supposés par le modèle. Anderson et Bouma (1973) proposent un modèle modifié, basé sur la probabilité de continuité de pores en forme de fentes, mais ce modèle ne prévoit que la conductivité du sol saturé.

c) *Prévision de la conductivité* in situ.

La prévision de la relation K(θ) d'un sol en place (Roulier *et al.*, 1972 ; Matzdorf *et al.*, 1975 ; Carvallo *et al.*, 1976) soulève des problèmes d'ordre différent, dus en particulier à la variabilité spatiale. Les conditions de texture, structure, variabilité de K(θ) et ψ(θ) sont rarement toutes explicitées, et il est souvent difficile d'interpréter les divergences entre les valeurs mesurées et calculées ; celles-ci sont-elles dues au

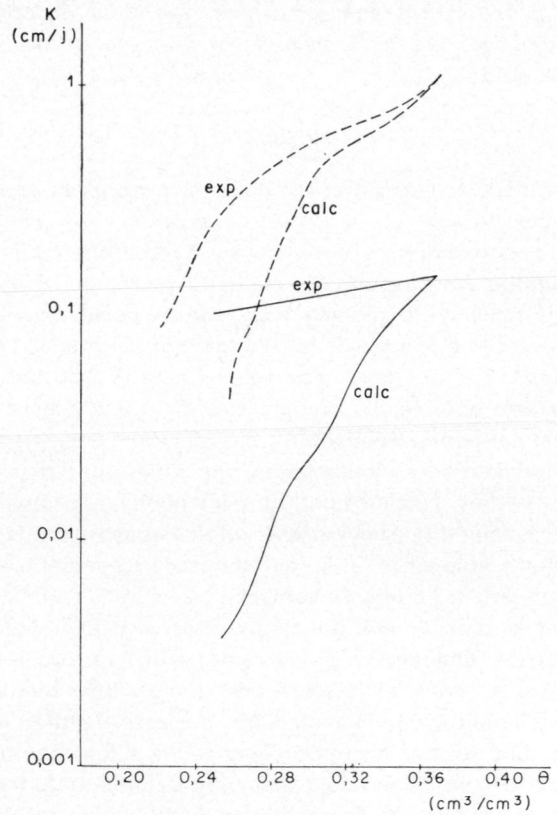


FIG. 6. — *Relation K (θ) calculée* (calc) *et expérimentale* (exp) *pour deux types de sol à structure continue* (d'après Bouma, 1973).

Hydraulic conductivity as a function of soil moisture content for two basic structured soils, experimentally determinated (exp) and calculated with series-parallel model (calc) (from Bouma 1973).

Sol	Granulométrie			K_S/K_{SC}
	< 2 μ	2-50 μ	50 μ-2 mm	
-----	13,8	8,4	77,8	0,003
—	19,6	11,4	69,8	0,000 4

non-respect des hypothèses imposées par le modèle, ou bien à la définition insuffisante des informations de départ (relation $\psi(\theta)$) ? Le problème principal qui reste posé est l'estimation de $K(\theta)$ ou $\psi(\theta)$ d'une surface importante, telle qu'un champ ou un bassin versant, à partir des mesures ponctuelles ; quand bien même on disposerait d'un modèle fiable pour prévoir la relation $K(\theta)$ d'un site, le problème de la représentativité de celui-ci, de la généralisation des résultats subsisterait. Nielsen *et al.* (1973), les premiers, déterminent expérimentalement la variabilité de $K(\theta)$ et $\psi(\theta)$ *in situ*. Rogowski (1971, 1972) propose une méthode pour estimer la relation $\psi(\theta)$ d'une

zone importante. Gardner (1974) fait remarquer que, dans de nombreux cas, certaines formules empiriques à 2 ou 3 paramètres donneraient des estimations aussi satisfaisantes que le modèle.

5. — *Conclusion*

L'évolution des modèles capillaires est liée aux progrès de la connaissance des paramètres physiques du sol. Les formules de type Kozeny ont été développées alors que les techniques d'analyse granulométrique (dont on déduit S_v) étaient généralisées, ce qui conduit à des formules qui mettent l'accent sur la phase solide et son degré de division, plus que sur la géométrie de l'espace poral. Avec le développement des méthodes de mesure et d'analyse de la relation $\psi(\theta)$ (Richards, 1949), il est devenu possible d'utiliser les tailles des pores équivalents et leur distribution, celle-ci étant traitée de façon variable pour rendre compte de la structure interne de l'espace poral (variation de la taille des pores, connexions ...).

Mais, quelles que soient les modifications apportées pour mieux rendre compte des caractéristiques réelles d'écoulement dans les milieux poreux, on doit toujours faire intervenir un facteur d'ajustement qui, selon l'expression de Gardner (1974), porte le poids de notre ignorance en ce qui concerne la géométrie des pores, l'air piégé, la viscosité du fluide, l'angle de contact...

Un certain nombre d'arguments ont été avancés pour expliquer les insuffisances des modèles capillaires : Dullien (1972) fait remarquer que tous les modèles constitués de capillaires droits négligent les pertes de charges dues aux variations de diamètre le long d'un chemin d'écoulement, d'où une surestimation de la conductivité calculée. Utiliser la théorie capillaire pour décrire l'écoulement, en particulier pour interpréter la courbe $\psi(\theta)$ en termes de distribution de taille de pores supposés cylindriques, est insuffisant dans le cas de certains milieux ; d'autres facteurs, l'adsorption de surface par exemple, influencent la rétention de l'eau dans le milieu poreux. Ces modèles constituent donc un moyen de prévoir $K(\theta)$ dans un domaine dont les limites sont mal définies, et ne permettent pas de progresser dans la compréhension de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux, ce qui limite leur intérêt théorique.

Conclusion

Il est en général possible de relier le coefficient de conductivité hydraulique défini par la loi de Darcy aux paramètres physiques du milieu poreux dans lequel l'eau circule.

Dans un premier cas, des observations systématiques aboutissent à l'établissement de corrélations ; une analyse rigoureuse est nécessaire pour dégager les paramètres utiles qui peuvent être réellement corrélés aux paramètres hydrodynamiques. Au prix de cette analyse, on obtient des formules qui constituent des guides précieux pour les interventions de type aménagement d'une zone agricole, fixation de modalités d'irrigation, de drainage... Malheureusement, ces corrélations ne concernent que la conductivité du milieu saturé et sont difficilement généralisables.

Dans le cas où le milieu n'est plus saturé en eau, on recourt à des modèles simplifiés du milieu, supposés équivalents du point de vue de l'écoulement. Une première série d'article présente les modèles dans leur forme originelle, les auteurs en précisant

bien les limites d'application ; ultérieurement, les recherches ont porté sur des modifications formelles de ces modèles, ce qui leur donne quelquefois un caractère arbitraire ; les tentatives faites pour étendre leurs limites d'application (milieux de texture fine, milieux structurés en particulier) ont été le plus souvent infructueuses ; mais ces études fournissent certains éléments de compréhension nouveaux.

La grande diversité des résultats publiés montre l'importance de ce problème et la nécessité toujours actuelle d'y apporter des solutions. En effet, parallèlement aux recherches entreprises pour résoudre l'équation différentielle non linéaire qui décrit l'écoulement dans des cas simples, il est indispensable de préciser les modalités d'application aux cas réels, plus complexes. L'étude des milieux où l'hypothèse capillaire est mise en défaut doit être entreprise si l'on veut sortir des limites étroites imposées par les modèles dans leur forme actuelle.

Reçu pour publication en novembre 1978.

Summary

Relationships between the hydraulic conductivity and the structure (Bibliographical review) of porous media

The equations describing the flow of water through porous media are introduced and discussed (limitations of Darcy's law, influence of pore structure...). Then, two types of approaches which have been used to establish relationships between the hydraulic conductivity, a phenomenological parameter defined by Darcy's law, and some physical characteristics of porous media, are reported. Either empirical correlations are found, or porous medium is represented by capillaric models (more or less complex bundles of capillary tubes) to which the equations of viscous flow apply. The value and the limitations of these approaches are discussed from published results.

Zusammenfassung

Beziehungen zwischen dem spezifischen wasserleitwert und der struktur der porosen umwelt (Bibliographische Untersuchung)

Die Gleichungen des Wasserabflusses in einer porösen Umwelt werden erinnert und erklärt (Anwendungsbedingungen, Einfluss der Umweltstruktur...) Zwei Annäherungsmethoden sind dann beschrieben, die ermöglichen, den spezifische Wasserleitwert, ein phänomenologischer im Darcyschen Gesetz bestimmter Parameter mit gewissen physischen Eigenschaften der porösen Umwelt zu verbinden. Im ersten Fall wurden statistische Beziehungen zwischen dem spezifischen Wasserleitwert und gewissen Strukturparametern festgestellt. Im zweiten Fall werden Betriebsmodelle, mehr oder weniger verwickelte Kapillarbündel, gesucht auf welchen die Gesetze des Abflusses der zähen Flüssigkeiten angewandt werden. Der Vorteil und die Grenzwerte dieser Annäherungsversuche werden an Hand der wichtigsten veröffentlichten Berichte besprochen.

РЕЗЮМЕ

Связь между удельной проводимостью воды и структурой пористой среды.

ХЮБЕР АГНЕССА

Прежде всего напоминаются и комментируются уравнения выражающие протекание воды в пористой среде (условия применения, влияние структуры среды). Затем предлагаются два подхода позволяющие связать удельную проводимость воды и фенологический параметр описанный законом Дарси, с некоторыми характерностями пористой среды. В первом случае устанавливаются статистические связи между удельной проводимостью воды и некоторыми параметрами структуры. Во втором — необходимо найти модели действия, более или менее комплексные пучки капиллярных сосудов, к которым и прилагаются законы протекания клейких жидкостей. Интерес и границы этих подходов обсуждаются на базе главных, опубликованных на зту иему, работ.

ANNEXE I

Dimensions du coefficient de conductivité hydraulique

K est le rapport entre le flux et le gradient de potentiel.

Le flux, volume d'eau écoulé par unité de surface et par unité de temps, a les dimensions LT^{-1}. Les dimensions du gradient de potentiel $\left(\frac{\text{énergie par quantité unitaire d'eau}}{\text{longueur}}\right)$ dépendent de celles du potentiel et fixent les dimensions de K.

a) Si l'énergie est exprimée par unité de masse

$$\text{grad } \Phi = \frac{ML^2T^{-2}}{ML} = LT^{-2}$$

$$K = \frac{LT^{-1}}{LT^{-2}} = T\,.$$

b) Si l'énergie est exprimée par unité de volume

$$\text{grad } \Phi = \frac{ML^2\,T^{-2}}{L^3\,L} = ML^{-2}\,T^{-2}$$

$$K = \frac{LT^{-1}}{ML^{-2}\,T^{-2}} = M^{-1}\,L^3\,T\,.$$

c) Si l'énergie est exprimée par unité de poids

$$\text{grad } \Phi = \frac{ML^2\,T^{-2}}{MLT^{-2}\,L} \qquad \text{sans dimension}$$

$$K = LT^{-1}$$

ANNEXE II

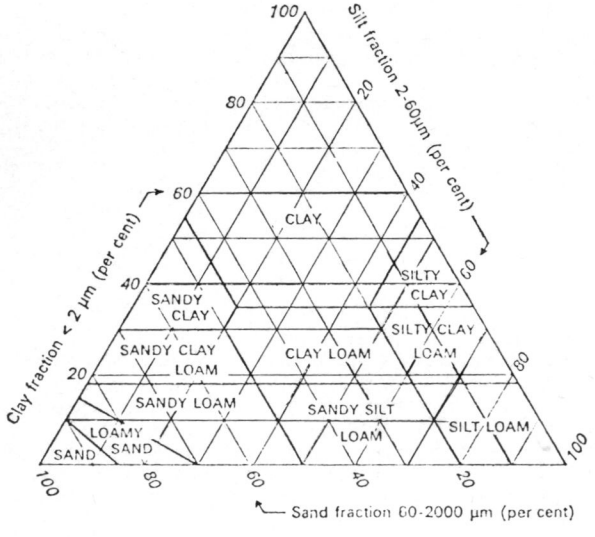


Diagramme de texture

Soil particle-size class diagram ; in *Soil Survey*. Technical monograph nº 9, p. 32, Rothamsted experimental station.

Références bibliographiques

AMEMIYA M., 1965. The influence of aggregate size on soil moisture content-capillary conductivity relations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29,** 744-748.

ANDERSON J. L., BOUMA J., 1973. Relationships between saturated hydraulic conductivity and morphometric data of an argillic horizon. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37,** 408-413.

BONELL M., 1976. Some comments on the association between saturated hydraulic conductivity and texture of Holderness boulder clay. *Catena*, 3, 77-90.

BORELI M., VACHAUD G., 1966. Note sur la détermination de la teneur en eau résiduelle et sur la variation de la perméabilité relative dans les sols non saturés. *C. R. Acad. Sci.*, Série A, **263,** 698-701.

BOUMA J., ANDERSON J. L., 1973. Relationships between soil structure characteristics and hydraulic conductivity. *Proc. Symp. Field soil water regime. Soil Sci. Soc. Amer.* Special Publication n° 5, 77-105.

BOUMA J., DENNING J. L., 1974. A comparison of hydraulic conductivities calculated with morphometric and physical methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38,** 124-127.

BROOKS R. H., COREY A. T., 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irr. Drain, Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs*, **4855,** 61-88.

BRUCE R. R., 1972. Hydraulic conductivity evaluation of the soil profile from soil water retention relations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36** (4), 555-561.

BRUST K. J., VAN BAVEL C. H. M., STIRK G. B., 1968. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots : III. — Comparison of field and laboratory data on retention and of measured and calculated conductivities. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32,** 322-326.

BURDINE N. T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Trans. Am. Inst. Min. Engrs*, **198,** 71-78.

CARMAN P. C., 1937. Fluid flow through granular beds. *Trans. Inst. Chem. Engrs*, **15,** 150-166.

CARMAN P. C., 1939. Permeability of saturated sands, soils and clays. *J. Agr. Sci.*, **29,** 262-273.

CARVALLO H. O., CASSEL D. K., HAMMON D. J., BAUER A., 1976. Spatial variability of *in situ* unsaturated hydraulic conductivity of Maddock sandy loam. *Soil Sci.*, **121,** (1), 1-8.

CHILDS E. C., COLLIS-GEORGE N., 1950. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. A.*, **201,** 392-405.

DARCY H., 1856. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon.* Dalmont, Paris.

DENNING J. L., BOUMA J., FALAYI O., VAN ROOYEN D. J., 1974. Calculations of hydraulic conductivities of horizons in some major soils in Wisconsin. *Geoderma*, **11,** 1-16.

DIEBOLD C. H., 1954. Permeability and intake rates of medium textured soils in relation to silt content and degree of compaction. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18,** 339-343.

DULLIEN F. A. L., 1972. Pore structure and flow properties of porous media. *Proc. 2nd Symp. Fundamentals of transport phenomena in porous media.* Aug. 7-11, 1972, Guelph Ontario, vol. I, 58-73.

FAIR G. M., HATCH L. P., 1933. Fondamental factors governing the streamline flow of water through sands. *J. Am. Water Works Assoc.*, **25,** 1551-1565.

GARDNER W. R., 1974. The permeability problem. *Soil Sci.*, **117** (5), 243-249.

GRAS R., 1971. *Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux.* Thèse, Strasbourg.

GREEN R. E., COREY J. C., 1971. Calculation of hydraulic conductivity : a further evaluation of some predictive methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35,** 3-8.

GUMBS F. A., 1974. Comparison of laboratory and field determined saturated hydraulic conductivity and prediction from soil particle size. *Trop. Agric.*, **51** (3), 375-382.

JACKSON R. D., REGINATO R. J., VAN BAVEL C. H. M., 1965. Comparison of measured and calculated hydraulic conductivities of unsaturated soils. *Water Resources Res.*, **1** (3), 375-380.

KLUTE A., 1972. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Sci.*, **113** (4), 264-276.

KOZENY J., 1927. Uber kapillare leitung des Wassers im Boden. *Sitzber Akad Wiss Wien Math Naturw*, Abt IIa, **136,** 271-306.

KUNZE R. J., UEHARA G., GRAHAM K., 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32,** 760-765.

LALIBERTE G. E., BROOKS R. H., COREY A. T., 1968 Permeability calculated from desaturation data. *J. Irrig. Drain, Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.* **5843,** 57-71.

MARSHALL T. J., 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. *J. Soil Sci.*, **9** (1), 1-8.

MASCH F. D., DENNY K. J., 1966. Grain size distribution and its effects on the permeability of unconsolidated sands. *Water Resources Res.*, **2** (4), 655-677.

MATZDORF K. D., CASSEL D. K., WORCESTER B. K., MALO D. D., 1975. *In situ* hydraulic conductivity at four hillslopes locations in a closed drainage system. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 508-512.

MILLINGTON R. J., QUIRK J. P., 1960. Permeability of porous solids. *Trans. 7th Inter Congr. Soil Sci.*, 1, 1200-1207.

MILLINGTON R. J., QUIRK J. P., 1964. Formation factor and permeability equations. *Nature*, n° 4928, 143-145.

NIELSEN D. R., DON KIRKHAM, PERRIER E. R., 1960. Soil capillary conductivity : comparison of measured an dalculated values. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24,** 157-160.

NIELSEN D. R., BIGGAR J. W., ERH K. T., 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, **42** (7), 215-259.

O'NEAL A. M., 1952. A key for evaluating soil permeability by means of certain field clues. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16,** 312-315.

PHILIP J. R., 1970. Flow in porous media. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **2,** 177-204.

RICHARDS L. A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.*, **68,** 95-112.

ROGOWSKI A. S., 1971. Watershed physics : model of the soil moisture characteristic. *Water Resources Res.*, **7** (6), 1575-1582.

ROGOWSKI A. S., 1972. Estimation of the soil moisture characteristic and hydraulic conductivity : comparison of models. *Soil Sci.*, **114** (6), 423-429.

ROULIER M. H., STOLZY L. H., LETEY J., WEEKS L. V., 1972. Approximation of field hydraulic conductivity by laboratory procedures on intact cores. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36** (3), 387-393.

SHARMA M. L., UEHARA G., 1968. Influence of soil structure on water relations in low humic latosols : I. — Water retention. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (6), 765-770.

SHARMA M. L., UEHARA G., 1968. Influence of soil structure on water relation in low humic latosols : II. — Water movement. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**(6), 770-774.

SHARMA M. L., UEHARA G., EKERN P. C., 1969. Comparison of measured and calculated capillary conductivity of a latosolic soil. *J. Ind. Soc. Soil Sci.*, **17** (4), 399-406.

SCHEIDEGGER A. E., 1974. *The physics of flow through porous media.* 3e ed., I Vol., 353 p., University of Toronto Press.

STOCKTON J. G., WARRICK A. W., 1971. Spatial variability of unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35,** 847-848.

WESSELING J., 1974. Hydraulic conductivity of natural Pachappa soil columns. *Soil Sci.*, **118** (1), 6-10.

WYLLIE M. R. T., ROSE W. D., 1950. Application of the Kozeny equation to consolidated porous media. *Nature*, **165,** 972.

WYLLIE M. R. J., GREGORY A. R., 1955. Fluid flow through unconsolidated porous aggregates. Effect of porosity and particle shape on Kozeny-Carman Constants. *Ind Eng. Chem.*, **47** (7), 1379-1388.

WYLLIE M. R. J., GARDNER G. H. F., 1958. The generalized Kozeny-Carman equation. Part 2 : A novel approach to problems of fluid flow. *World Oil*, **146** (5), 210-228.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 499-519.

Etude bibliographique

Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique

I. — Précision dans la délimitation des sols

J. P. LEGROS

Service d'étude des Sols
Centre de Recherches de Montpellier, I.N.R.A.,
9, place Viala, 34060 Montpellier Cedex

Résumé

L'informatique et la statistique ont été largement employées depuis quelques années en cartographie pédologique. De très nombreuses publications en attestent. Les objectifs principaux sont les suivants : améliorer la cohérence et la validité de la logique cartographique, contrôler la précision, fournir les moyens d'estimer l'importance des travaux de terrain nécessaires dans tel cas particulier. Une synthèse est proposée qui s'appuie essentiellement sur les recherches menées à l'étranger, Royaume-Uni et Etats-Unis en particulier. Dans une première partie, présentée ci-dessous, on envisage :

— le choix des critères de cartographie. Il apparaît qu'un effort important a été tenté pour vérifier la validité du choix des critères de cartographie car ceux-ci conditionnent la signification de la carte ;
— la précision au niveau du zonage. Les travaux portant sur cette question primordiale sont nombreux mais les notions de pureté, de variabilité, de précision des limites ne sont pas toujours clairement distinguées. Un effort de classement et de définition est tenté en même temps qu'une présentation des méthodes de contrôle.

En annexe les différentes méthodes de cartographie pédologique sont répertoriées et synthétisées afin d'aider à la compréhension générale du texte.

Introduction générale

Cette analyse bibliographique a pour objet de présenter les progrès méthodologiques récents réalisés en cartographie pédologique au moyen de la Statistique et de l'Informatique.

Les apports de ces disciplines extérieures à la pédologie sont divers et nombreux, bien que la plupart aient trait au contrôle de la précision. Pour les envisager sans trop de désordre, nous nous proposons de les passer en revue en suivant le chemine-

ment logique qui prévaut lorsqu'on réalise une carte de sol. Ainsi, nous étudierons successivement : le choix des critères de cartographie, la précision au niveau du zonage, la quantité d'information nécessaire, la qualité de l'information, la validité des déterminations analytiques.

A chaque étape nous rechercherons quelles sont les difficultés et quels sont les moyens statistiques et informatiques de les résoudre. De brèves discussions suivront afin de faire le point sur les diverses questions.

Notre plan qui s'appuie étroitement sur la démarche habituelle du cartographe présente des inconvénients. Le principal réside dans le fait qu'il existe justement plusieurs façons de conduire une prospection sur le terrain. On peut, par exemple, implanter les profils puis, tracer ultérieurement les limites (cartographie à l'aide d'une grille régulière de prélèvement = grid mapping) ou bien délimiter d'abord les sols, puis choisir en fonction de cela la localisation des profils (cartographie libre = free survey). C'est cette dernière méthode, d'emploi plus général, qui nous servira de fil conducteur mais les problèmes spécifiques posés dans les autres cas ne seront pas négligés. (Voir à ce sujet en annexe une présentation succincte des différents types de démarches cartographiques.)

Cette synthèse s'appuie sur l'analyse d'articles publiés depuis 10 ans dans différentes revues traitant de Science du Sol et imprimées par les pays suivants : Belgique, Canada, France, Hollande, Royaume-Uni, URSS, USA. Notons que certains de ces périodiques relatent des travaux en provenance d'autres pays (Australie, Nouvelle-Zélande...). En outre, nous avons étudié les communications présentées à l'occasion de grands congrès internationaux et de réunions spécialisées qui se multiplient actuellement (Congrès d'Arlon, meetings de Wageningen, Canberra, Varna). Le reste de la documentation utilisée a été obtenue directement auprès des auteurs à l'occasion de missions d'information.

Cependant divers problèmes importants, qui pourraient faire l'objet de développements séparés, ont été laissés de côté. Il paraît indispensable de les mentionner afin de mieux délimiter notre sujet :

— Les banques de données pédologiques.

Elles induisent parfois et conditionnent souvent les progrès méthodologiques dont il va être question, mais nous avons choisi de mettre l'accent sur les méthodes plutôt que sur un tel type d'outil,

— La cartographie assistée par ordinateur.

Les réalisations dans ce domaine sont encore trop récentes pour qu'on analyse avec suffisamment de recul quelles vont être les conséquences sur la méthodologie cartographique.

— Les classifications automatiques de sols.

Les réalisations sont relativement nombreuses et très intéressantes. On se rapportera surtout aux travaux de De Gruijter en Hollande, à ceux de Norris en Australie, Van den Driessche et Girard en France, Webster en Angleterre... Une synthèse bibliographique serait souhaitable.

En définitive, nous ne nous intéresserons ici qu'à l'établissement de la carte des sols pour montrer comment procéder aussi rationnellement et économiquement que possible, en prenant les garanties scientifiques nécessaires.

Rappelons à ce sujet quelques références d'ouvrages fondamentaux portant sur la méthodologie de l'inventaire des sols et susceptibles de compléter sur bien des points le travail qui suit (Soil Survey Staff, 1951 ; Jamagne, 1967 ; Maignien, 1969 ; Burrough *et al.*, 1971 ; S. E. S. Montpellier, 1972).

Première partie

Précision dans la délimitation des sols

Introduction

Dans cette première partie sont envisagés les problèmes relatifs à la délimitation des sols : choix des critères de cartographie et zonage.

Dans un second article nous aborderons la caractérisation des unités pédologiques en relation avec la quantité et la qualité de l'information disponible. La bibliographie sera jointe à la seconde partie de la publication.

I. — Choix des critères de cartographie

a) *Le problème*

Les critères de cartographie sont les caractères du profil et de l'environnement pédologique qui vont être utilisés pour différencier et délimiter les sols. Leur choix définit la logique du travail de terrain ce qui implique, à terme pour la carte, une complexité et donc un coût déterminé. En effet il a été montré, en prenant toutes les précautions nécessaires, qu'il existait une relation nette entre la longueur des limites de sols tracées sur la carte et le prix de revient de celle-ci (Bie et Beckett, 1971-2). Naturellement, l'efficience de la carte est aussi en cause. Celle-ci sera d'autant plus utile, pratiquement, qu'elle présentera des unités simples homogènes et non pas des associations comprenant différents sols imbriqués d'une manière plus ou moins bien explicitée (Tomlinson, 1970).

Ainsi, le choix des critères est important. Il est de plus difficile car il dépend à la fois des résultats scientifiques acquis antérieurement, des conditions particulières dans lesquelles s'effectue le travail, de l'objectif final de la cartographie. Or, il n'existe pas de méthode très précise et le pédologue responsable devra faire appel à son expérience et à son intuition. Les principaux éléments qui doivent conditionner les décisions sont les suivants :

— *La signification agronomique ou pédogénétique* des critères retenus. *A priori*, prendre en compte la texture ou l'hydromorphie, paraît plus important que de différencier les sols à partir de la taille des éléments structuraux.

— *L'efficacité* de la délimitation des sols sur la base de critères envisagés. Il s'agit, par définition, de trouver les moyens de reconnaître les unités cartographiques. Il faut donc choisir des éléments d'emploi aisé et rapide (pente du terrain, texture de

l'horizon de surface, etc...). Idéalement les critères de cartographie sont indépendants (éviter l'information redondante) et très fortement corrélés avec les caractères des sols non directement pris en compte (éviter la perte d'information). A l'heure actuelle, ces questions sont encore insuffisamment connues, on progressera probablement en utilisant conjointement les banques de données pédologiques nouvellement créées et les méthodes statistiques appropriées. Quelques essais ont déjà été tentés pour étudier systématiquement les relations entre les différents caractères du sol (Mc Keague *et al.*, 1971 ; Kloosterman *et al.*, 1974).

— Les critères doivent enfin être *adaptés* à chaque cas considéré. D'abord en fonction de l'échelle qui dicte plus ou moins le niveau taxonomique de représentation sur la carte et de délimitation sur le terrain (types de sol, familles de sol etc...) ; ensuite en fonction du milieu car seuls sont intéressants les caractères du sol ou de l'environnement ayant une valeur discriminante. Ainsi, pour réaliser une cartographie rapide on pourra préférer des critères géologiques plutôt que géomorphologiques s'il s'avère que les premiers déterminent une plus faible proportion d'associations de sols (Tomlinson, 1970 - sus cité).

b) *Contrôle de la validité des critères et de la valeur discriminante des tracés cartographiques correspondants*

Contrôler la validité des critères est d'autant plus important que ceux-ci, on l'a vu, sont choisis d'une manière qui laisse place à un certain degré de subjectivité. Des méthodes ont été mises au point et seront présentées ci-après. Cependant, il est nécessaire de noter immédiatement que le problème de la précision à ce niveau ne sera pas réglé dans son ensemble. En effet, sauf lorsque l'on confie à l'ordinateur le soin de tracer les limites par interpolation (certains types de cartographie par grille) les critères sont en nombre nécessairement restreint. On peut même n'en prendre qu'un seul pour tracer, par exemple, des lignes isovaleurs de pH. En définitive, il ne faut pas perdre de vue qu'une carte peut être très juste relativement au critère choisi tout en constituant un modèle fort médiocre pour la caractérisation globale du milieu. A l'heure actuelle, on sait parfaitement chiffrer la cohérence du modèle cartographique par rapport aux hypothèses qui ont servi à l'établir alors qu'on ne peut qu'estimer sa validité au plan agronomique (efficacité pour la mise en valeur) ou pédogénétique (utilité pour comprendre dans quelles conditions de milieu les sols observés se sont formés).

Une première méthode de contrôle numérique peut être proposée qui dérive directement des travaux entrepris dès 1971 par un chercheur australien, hélas disparu depuis (Norris, 1971-1) :

On soumet l'ensemble des données de profils (résultats analytiques, description du sol et de l'environnement immédiat) à un programme de classification automatique. L'objet est ici de déterminer la structure des données, c'est-à-dire de définir les regroupements naturels des profils à l'intérieur d'unités cartographiques. Ensuite, on recommence le même travail mais en tenant compte cette fois seulement des caractères qui ont servi de critères de cartographie. Les regroupements obtenus sont moins précis et certains profils sont déplacés d'un groupe à l'autre. Le nombre d'erreurs de classement, exprimé en pourcentage, fournit une sorte de quantification de l'im-

précision globalement introduite par l'utilisation sur le terrain des critères de cartographie, à l'exclusion d'autres données collationnées par la suite, qui entreront dans la définition finale des sols. A la limite, un seul critère peut être utilisé pour le deuxième regroupement afin de jauger son efficacité intrinsèque.

Une autre approche définit la qualité des critères par la valeur discriminante de la cartographie qui en résulte. Plusieurs formules ont été proposées qui utilisent le principe de l'analyse de variance : Beckett, 1967 ; Webster et Beckett, 1968 ; Burrough, 1969 (voir référence Beckett et Burrough, 1971). On considère que la cartographie est bonne, pour un caractère donné, si les variations qui correspondent à ce dernier et interviennent entre divers profils appartenant à la même unité, sont faibles par rapport aux variations de même nature observées dans l'ensemble des profils de la carte. Il est possible de quantifier cela par :

$$RV = \frac{\text{variance dans les unités de sols}}{\text{variance totale}}$$

où RV est la variance relative qui peut prendre des valeurs allant de 0 (unités cartographiques parfaitement homogènes) à 1 (carte sans aucun intérêt). La quantité 1-RV constitue donc une mesure de la qualité de la carte pour un caractère donné. Suivant la nature de ce dernier, l'échelle, la densité des observations, les auteurs obtiennent des valeurs de 1 — RV comprises entre 0,20 et 0,95.

Cette méthode nous paraît intéressante car elle permet, à postériori, de bien se rendre compte de la validité de la cartographie par rapport à telle ou telle propriété du sol. Ceci peut être précieux à l'occasion de l'établissement d'une carte monothématique d'application.

Les inconvénients du procédé sont à notre avis les suivants :

— L'analyse de la variance suppose satisfaites diverses conditions (normalité, homoscédasticité *) qu'on ne peut pratiquement jamais vérifier. En fait RV doit être regardé comme un simple indicateur ; on ne peut apprécier par un test le degré de confiance à lui accorder.

— Seules les unités considérées comme différentes relativement au caractère choisi, doivent être prises en compte. Cela signifie que le résultat du test dépend à la fois de la qualité du travail, de l'hétérogénéité naturelle du terrain, de la volonté du pédologue d'affiner plus ou moins la différenciation. A quantité d'information donnée, on a : classement plus fin = information plus grande mais certitude moins forte et risque d'erreur accru.

— Il est certain que cette méthode est difficilement applicable à des variables qualitatives.

— Lorsque l'on veut tester simultanément la validité de plusieurs critères, il faut combiner les valeurs 1 — RV obtenues pour chacun d'eux. Se pose alors le problème de la pondération, c'est-à-dire de l'importance plus ou moins grande à donner à tel ou tel caractère... En fait, il ne faut pas perdre de vue, ici comme dans beaucoup d'autres cas, que l'objectif n'est pas de savoir si la pondération est bonne mais si le résultat final est juste. Une solution classique consiste à essayer plusieurs types de

* Mêmes variances.

pondérations. Quelquefois le résultat final varie très peu, il est alors considéré comme particulièrement fiable.

En fait, prendre en compte simultanément et mathématiquement toute une série de caractères est possible au moyen de l'analyse de variance généralisée à plusieurs variables ; les calculs devant être réalisés sur ordinateur. Cela a été fait en cartographie (Webster, 1971). Le problème de la pondération demeure cependant et la méthode est trop complexe pour être exposée ici (cf. test de Wilks).

Enfin l'analyse canonique que l'on peut schématiser par $(y_1, y_2, y_3...) = f(x_1, x_2, x_3, x_4...)$ a été utilisée en pédologie pour mieux comprendre les relations liant les caractères du profil et ceux de l'environnement (Webster, 1977). Elle pourrait aussi aider à jauger l'intérêt des critères de cartographie en mesurant, globalement, leur corrélation avec l'ensemble des données relatives au sol.

c) *Discussion*

Il est curieux de constater que pour solutionner le seul problème de la validité des critères de cartographie, il est possible de faire appel à toute une panoplie statistique : analyse de variance, corrélations, méthodes de classification automatique...

Les outils disponibles sont donc polyvalents et permettent, comme on le verra plus loin, de valoriser et de quantifier bien des idées.

Naturellement, ils ne sauraient aider à fournir des recettes évitant toute réflexion. Au contraire, l'utilisation de l'ordinateur exige que chaque point soit précisé. Ainsi, tout ce qui concerne les pondérations devra être réfléchi et cohérent. L'intuition, au contraire, nous aidait à viser à peu près juste tout en employant des raisonnements approximatifs sur lesquels on évitait de se pencher dans le détail. Dans ces conditions, les progrès étaient parfois difficiles en cartographie.

II. — Zonage

a) *Les différentes approches*

Une unité cartographique peut concrètement contenir divers types de terrains :

— un ou plusieurs sols typiques, décrits en légende et sur la base desquels l'unité a été définie et délimitée. On parlera ainsi d'unité simple, d'association de sols ou même de complexe de sols lorsqu'une cartographie à échelle supérieure au 1/15 840e (en fait 4 inches/mile) n'aurait pas permis de séparer les divers types pédologiques présents (Soil Survey Staff, 1951),

— des secteurs moins ou même peu typiques qui, à l'intérieur d'une unité, correspondent pour tels ou tels caractères à une ou l'autre des extrémités possibles de la gamme de variation. Il s'agit de ce qu'on appelle en statistique « les queues de distribution ». Les pédologues utilisent alors l'expression « variation locale », c'est-à-dire qu'ils font explicitement référence à un profil type, profil moyen, ou profil médian caractérisant l'unité sur le terrain. A ce niveau, le problème consiste à calculer la *variabilité*, sorte d'hétérogénéité moyenne,

— des sols qui diffèrent complètement du ou des types pédologiques, définis en légende. Ces sols, appartenant à d'autres unités, observées ou non dans le cadre de la cartographie, n'ont pas été différenciés à la suite d'erreurs, d'omissions, ou de contraintes techniques. Ces inclusions se distingueraient des précédentes parce qu'elles sont reconnues comme génétiquement différentes et parce que leur présence et leur position dans le paysage peuvent être comprises et expliquées (Jansen et Arnold, 1976). On parle alors *d'impuretés* qu'il s'agit de comptabiliser à part.

En admettant qu'un contrôle ait permis de reconnaître toutes les composantes d'une unité déterminée, il sera cependant difficile de distinguer les variations locales et les impuretés car la différence entre les deux concepts est liée à la fois au changement de système de référence (profil type d'un côté, légende ou classification de l'autre), au type de mesure (quantitative contre qualitative) et à l'intensité du phénomène.

Enfin le problème de la précision, au niveau du zonage, peut être abordé d'une manière fort différente, dans son principe, de celle qui vient d'être présentée. Il s'agit de déterminer *la précision des limites* par rapport à un dessin considéré comme idéalement exact. En fait, ces notions ne sont pas indépendantes car une erreur sur la limite accroît, au moins d'un côté du trait, le pourcentage d'impuretés dans l'unité qui se trouve là.

b) *Amélioration de la pureté et de la précision des limites, réduction de la variabilité*

Pureté, variabilité et précision des limites sont assez liées pour qu'on puisse envisager globalement leur amélioration. Les progrès dans ce domaine sont incontestablement liés, pour une large part, au développement de la télédétection, ceci dans trois directions au moins (C. M. et M. C. Girard, 1975 ; Naert, 1977 ; Peyronel, 1977).

Enregistrement des données.

Différents facteurs, non perceptibles directement par l'homme, sont parfois importants au plan de la cartographie ; par exemple, l'information donnée par l'infrarouge sur l'humidité. Ces méthodes facilitent donc la détection de ce qui, sans cela, risque de devenir une impureté.

Traitement des données.

L'équidensitométrie permet de faire une délimitation objective de surfaces liées à des valeurs de gris différentes. Ceci est évidemment très intéressant pour la cartographie pédologique, à condition que les travaux de laboratoire soient associés à un étalonnage et à des vérifications au sol. De plus, de nouveaux éléments sont mis en évidence par la combinaison et la comparaison d'images. La précision des limites est donc accrue dans presque tous les cas.

Présentation des données.

Les procédés optiques de reprographie tendent à remplacer les reports manuels de tracés, plus longs et moins précis.

Notons cependant que la statistique et l'informatique peuvent parfois aider à améliorer la précision des limites en fournissant des méthodes d'interpolation (cartographie par maille) ou bien encore en aidant à la construction de modèles ayant pour objet une meilleure compréhension de ce qu'est la transition entre deux types de sols. Deux tentatives, au moins, méritent d'être signalées :

— La première a pour objet de positionner, dans les meilleures conditions possibles, une limite lorsque les caractères des sols en cause subissent des variations très progressives (Webster, 1973). Pour cela un transect est réalisé, avec analyse du sol, à intervalle fixe (soit n profils numérotés de 1 à n). On construit alors la courbe liant les points xi, yi où :

- xi est la distance entre l'origine du transect et le profil i,
- yi est soit la valeur d'un caractère du profil i, par exemple la teneur en argile, soit une fonction de l'ensemble des caractères mesurés dans le profil i (par exemple : projection du point représentant le profil sur le premier axe d'une analyse en composantes principales).

La courbe est ensuite segmentée arbitrairement, de diverses façons, et l'ordinateur détermine par itérations, au moyen de l'analyse de variance ou au moyen des distances de Mahalanobis, le meilleur découpage possible.

Enfin, on peut comparer le résultat obtenu avec celui fourni par le cartographe et chercher les raisons d'une éventuelle non coïncidence des limites. Cette méthode, outre son intérêt au niveau de l'amélioration de la logique de la cartographie, peut probablement servir à affiner le choix des seuils pour les divers critères quantitatifs utilisés lors de la délimitation des sols.

— La seconde méthode a été développée pour comparer plusieurs façons de positionner automatiquement une limite entre deux unités contiguës (Campbell, 1977). Cette fois on raisonne en surface, et non pas suivant un transect. Ceci mis à part, la démarche est voisine de la précédente : trois modèles mathématiques sont proposés pour définir la transition cartographique. Le meilleur est celui pour lequel la partie non expliquée de la variation (variance résiduelle) est minimale avec une répartition aléatoire des résidus. Dans le cas précis, on observe une limite cartographique qui peut être considérée comme : abrupte pour la teneur en sable, progressive pour d'autres caractères, inexistante pour le pH.

Naturellement, dans un certain nombre de cas, les limites ne correspondent pas à une réalité physique bien précise mais expriment une conception (regroupement en associations de sols, cartographie à très petite échelle). La modélisation devient presque impossible. La précision est alors fortement liée à la qualité des raisonnements, à celle des définitions ; elle est en conséquence difficile à quantifier.

c) *Contrôle de la précision des limites*

Le Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA) a souhaité que les limites atteignent, au moins, la précision suivante :

— Etudes de reconnaissance : 500 à 1 000 m
(1/100 000 à 1/50 000)

— Etudes semi-détaillées : 100 à 200 m
(1/20 000 et 1/25 000)
— Etudes détaillées : 35 à 50 m.
(1/2 500 à 1/10 000)

En définitive il semble qu'une incertitude de 5 mm, en plus ou en moins, pour le tracé des limites sur la carte constitue une valeur couramment admise et raisonnable, quelle que soit l'échelle.

Il n'existe, à notre connaissance, qu'une seule méthode de contrôle qui a toutefois l'inconvénient de nécessiter un retour sur le terrain et une nouvelle cartographie réalisée avec le maximum de détail, à très grande échelle au niveau des levés, en respectant la logique qui prévalait à l'occasion de la prospection initiale (mêmes critères de cartographie, même légende). Cette seconde carte, la « best possible map » = BPM (Beckett et Burrough, 1971-1) sert de référence et est considérée comme précise à 100 p. 100. On superpose alors les deux documents, ramenés à la même dimension, et on calcule de la manière suivante le pourcentage de succès PS :

$$PS = 100 - \sum_{i=1}^{U} \left| \frac{S\ carte\ (i) - S\ BPM\ (i)}{2.S} \right|$$

avec* :

S carte (i) = Surface de l'unité i sur la carte originelle ;
S BPM (i) = Surface de l'unité i sur la carte de référence ;
S = Surface totale de chaque carte ;
2 = Facteur tenant compte du fait qu'une erreur en plus dans une unité correspond à une erreur en moins dans l'unité adjacente ;
U = Le nombre total d'unités de sol.

PS est donc bien une sorte de mesure de la précision des limites. Il existe d'ailleurs des méthodes pour calculer la longueur de celles-ci (Beckett et Bie, 1975), si bien que PS pourrait être exprimé en mm d'incertitude, plutôt qu'en pourcentage de surface.

Les auteurs, pour différentes échelles et différents types de cartographie, obtiennent des valeurs de PS comprises entre 70 et 90 p. 100. Un tel travail de contrôle ne peut pas être recommandé dans le cas général, mais appliqué localement à des échantillons de carte représentatifs, il peut fournir des renseignements intéressants sur la précision globale du travail.

Remarquons que l'introduction de la cartographie assistée par ordinateur, et plus particulièrement la schématisation de la carte initiale au moyen de petites surfaces élémentaires carrées, pose d'importants problèmes de précision des limites. Divers travaux traitent de ces questions mais cela dépasse le cadre de notre exposé.

d) *Contrôle de la pureté*

La pureté est une notion importante pour l'aménageur et devrait être calculée pour tous les documents produits. En effet, elle exprime le degré de confiance qu'on

---

* Afin d'assurer la cohérence de l'ensemble de l'exposé, nous n'avons pas conservé la nomenclature originale des auteurs pour les différentes formules citées. Aussi, dans tout ce qui suit E sera l'échelle, S la surface de la carte etc... voir annexe B, p. 517.

peut accorder à la carte et donc le bien fondé de l'application, en un point précis, d'une technique de mise en valeur recommandée au niveau de l'unité pédologique.

Naturellement toutes les unités de sol délimitées n'ont pas la même pureté car celle-ci dépend :

— de l'hétérogénéité naturelle du terrain,

— de la conception qu'on peut avoir de l'homogénéité (notion d'échelle, type de cartographie),

— de l'aptitude du pédologue responsable à effectuer des tracés précis et surtout à choisir des critères de cartographie adaptés.

De toutes façons le même degré de pureté n'est pas indispensable dans tous les cas. Par exemple, dans le domaine de l'aménagement, on est plus exigeant pour les cartes établies en vue du drainage que pour celles intéressant l'irrigation.

La plupart des méthodes proposées pour la mesure de la pureté, reposent sur le même principe : il faut retourner sur le terrain et réaliser des travaux de contrôle à une échelle nettement plus grande que la première fois. Cependant, il n'est pas nécessaire de couvrir à nouveau toute la surface. On se contente de vérifier quelques unités principales ou bien encore de réaliser des transects. Nous allons présenter ici quelques techniques intéressantes :

— la zone de contrôle est divisée de manière identique sur les deux cartes en une série de petits carrés que l'on compare deux à deux (Maussel *et al.*, 1970-2). Le nombre de carrés dans lesquels le sol n'a pas été correctement identifié, lors de la prospection initiale, est ramené au nombre total des carrés vérifiés. Ce rapport donne une assez bonne idée de la justesse de la carte relativement à la B. P. M.

— en l'absence de B. P. M., un transect très détaillé est effectué en déterminant ponctuellement, par exemple tous les 50 m, quelle est la nature du sol, puis en vérifiant, s'il y a accord ou non, avec ce qui a été porté sur la carte (Powell et Springer, 1965). La pureté est ainsi déterminée pour chaque unité traversée.

— à l'occasion de la cartographie pédologique en Pays d'Ouche à 1/10 000 (Favrot et Bouzigues, 1975), une méthode voisine, mais moins coûteuse, a été employée: les unités de sols sont délimitées au moyen de sondages, les profils sont implantés par la suite sur la maquette provisoire, sans intervention de la personne qui a prospecté le secteur en cause. Le pourcentage de concordance entre les types de sols mentionnés sur la maquette et ceux ultérieurement observés sur le terrain, est alors calculé. L'expérience montre que le résultat varie entre 60 p. 100 et 80 p. 100 de concordance, en fonction de l'expérience du cartographe et de la nature des caractères du sol qui servent de référence. Naturellement cette méthode n'a de sens que lors de travaux importants amenant l'ouverture de très nombreux profils (1 650 fosses pédologiques pour l'étude du Pays d'Ouche).

Dans tous les cas, ce qui est difficile, c'est de définir le degré de ressemblance entre le sol observé et celui qui est normalement attendu. Les raisons tiennent à la nature des différences, à leur nombre et à leur hiérarchie.

Il est possible de considérer comme différent de l'orthotype un sol qui a, par exemple, un, deux ou trois caractères extérieurs aux gammes de variations tolérables (Bascomb et Jarvis, 1976). Par ailleurs, il ne faut pas oublier que le résultat final dépendra du niveau de classification qui sert d'étalon. Ainsi, pour des sols de l'Ohio,

des chercheurs ont obtenu en se référant à la classification américaine (Mc Cormack et Wilding, 1969) :

— 17 p. 100 des observations correctement identifiées au niveau de la série (26 p. 100 des observations appartiennent à des taxons immédiatement voisins),
— 22 p. 100 des observations correctement identifiées au niveau du sous-groupe,
— 44 p. 100 des observations correctement identifiées au niveau du grand groupe,
— 74 p. 100 des observations correctement identifiées au niveau de l'ordre.

En bref, la pureté est à apprécier en rapport avec le degré taxonomique correspondant au niveau de délimitation des sols.

En fait, le calcul de la proportion d'impuretés, s'il est intéressant, n'est pas une fin en soi. Ce qui compte c'est la fiabilité de la carte. Or ce document est utile dans la mesure où il peut être employé pour prédire, aussi précisément que le permet la légende, le type de sol qu'on trouvera sur le terrain en un point donné. Il est donc souhaitable d'achever le calcul de la manière suivante (Bie et Beckett, 1971-1) :

— soit S_i/S la surface de l'unité i en valeur relative,
— soit d_i la surface des impuretés, en valeur relative dans cette unité.

Dans l'unité i la surface réellement connue est $S_i(1 - d_i)$, mais on ne sait pas exactement où elle se trouve (les impuretés, par définition, ne sont pas délimitées sur

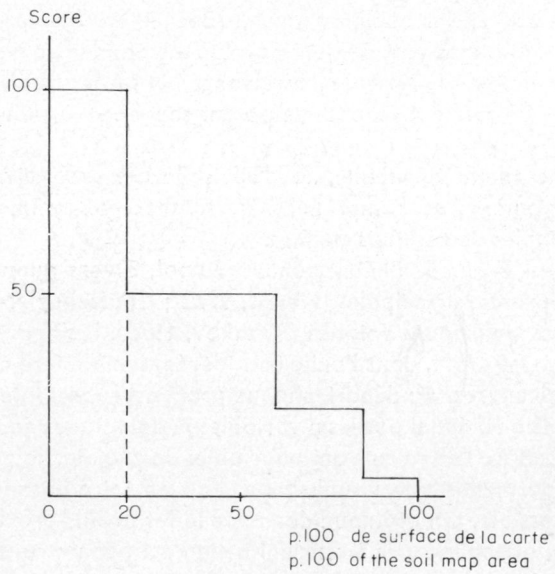


FIG. 1. — *Contrôle de la validité d'une carte par le « Score »* (d'après Bie et Beckett, 1971). Sur 20 p. 100 de la surface de la carte seulement, on est sûr de rencontrer le type de sol défini en légende (en l'absence d'impuretés).

Testing soil map validity by the « score » (from Bie and Beckett, 1971).
On 20 p. 100 only of the soil map area, we are certained to get the soil unit defined in the legend (unit without impurities)

la carte, même si le mémoire explicatif indique comment les localiser sur le terrain). La probabilité de tomber sur la surface qu'on connaît est alors : $p = 1 - d_i$.

Ceci permet aux auteurs de définir un « score » qui n'est autre que l'espérance mathématique de la variable « surface connue ».

$$\text{Score} = \sum_{i=1}^{U} \frac{S_i.(1 - d_i)^2}{S}.$$

Lorsque les unités de sols sont complexes (plusieurs types pédologiques représentés), ou bien lorsque plusieurs sortes d'impuretés sont observées, la formulation du score se complique quelque peu et le lecteur a intérêt à se reporter à l'article original mentionné ci-dessus. Par ailleurs, le score peut être calculé unité par unité et présenté sous forme probabiliste (fig. 1). Globalement, les valeurs du score sont extrêmement différentes suivant les unités de sol et les cartes considérées (de 10 à 100 p. 100).

e) *Contrôle de la variabilité des caractères pédologiques dans l'unité de sol*

Les sols sont des objets, qui, souvent, ne sont pas nettement individualisés les uns par rapport aux autres et possèdent une hétérogénéité non négligeable dont on pourrait dire qu'elle est un de leurs caractères les plus constants ! Les pédologues cartographes ont tout à fait conscience de ces difficultés et un nombre considérable de publications traitent de la variabilité du sol. Une revue très documentée a d'ailleurs été réalisée sur ce sujet, il y a quelques années (Beckett et Webster, 1971). Naturellement ces travaux ont été essentiellement développés dans les pays où la couverture pédologique systématique du territoire est avancée et où le problème de l'utilisation pratique de cartes de sols pré-établies se posent souvent (Grande-Bretagne et USA, notamment).

En ce qui concerne la variabilité, nous envisagerons successivement : la mise en évidence du phénomène, sa compréhension, sa mesure. Enfin, nous terminerons par quelques exemples de résultats chiffrés.

Pour mettre en évidence l'hétérogénéité du sol, divers auteurs recommandent l'analyse en composantes principales (Norris, 1972 ; Courteney et Webster, 1972) ou bien des techniques statistiques voisines (Rozhkov, 1975). Il s'agit, en fait, d'observer dans quelle mesure tel profil, dans l'unité considérée, semble être affecté globalement de propriétés particulières. Au départ, chaque profil est représenté par un point dans l'espace à n dimensions, défini par les n variables pédologiques quantitatives retenues pour sa caractérisation. Les calculs ont pour objet de projeter le nuage de points sur un plan afin de permettre une visualisation, tout en introduisant une déformation aussi faible que possible. On distingue donc par là les profils proches, qui se ressemblent, et ceux qui, éloignés, se différencient nettement par un caractère ou plusieurs caractères combinés.

Comprendre à quoi sont dues les variations des caractères du profil à l'intérieur d'une unité est évidemment utile et important. A ce niveau, l'intuition, associée à des règles de prospection adaptées (voir plus loin), peuvent suffire pour obtenir le résultat recherché, concernant par exemple la variabilité des podzols de la partie nord de la Russie (Tonkonogov, 1971). Cependant, des méthodes plus sophistiquées, sinon

plus efficaces, ont été développées pour préciser la distribution en surface de l'hétérogénéité (Walker *et al.*, 1968) : des prélèvements sont réalisés aux nœuds d'une grille régulière définie par des droites parallèles à un axe x et d'autres parallèles à un axe y perpendiculaire au premier. On cherche l'équation en x et y permettant de prédire les propriétés du sol en chaque point du paysage. Il est alors possible de comprendre s'il existe un trend (cf. statistiques économiques) ou si les variations par rapport au type moyen sont distribuées au hasard.

Au plan mathématique la variabilité est caractérisée par son intensité moyenne mais aussi par les courbes de fréquence liant l'importance des variations au nombre de fois où ces dernières se produisent.

La mesure de l'intensité est simple dans son principe : pour un caractère donné du sol, on calcule la moyenne $\bar{x}$, l'écart type s et le coefficient de variation $CV = s/\bar{x}$. La difficulté est de savoir à quel niveau se situer car il est possible de déterminer :

— la variation intervenant dans chaque pédon (volume élémentaire de sol),

— la variation intervenant entre des pédons voisins,

— la variation introduite par le fait que l'on change de parcelle et que le mode d'exploitation agricole n'est pas le même,

— la variation introduite lorsqu'on change de zone élémentaire représentée sur la carte (mapping delineation),

— la variation introduite lorsqu'on change d'unité pédologique (mapping unit). Notons que l'objectif de la cartographie est justement de rendre compte de ce dernier type de variation.

Idéalement le problème devrait pouvoir être traité globalement en décomposant par analyse de variance la fluctuation totale en une série de fluctuations partielles additives. La technique est bien connue des agronomes pratiquant l'expérimentation. En fait, cela est impossible par suite du nombre considérable de résultats analytiques dont il faudrait disposer pour la même étude pédologique si on voulait juger simultanément du poids respectif de chacun des facteurs de variation. Aussi, les résultats acquis par les différents auteurs ne portent chacun que sur un ou deux facteurs précis et sont difficilement comparables car les coefficients de variation ne possèdent pas la propriété d'additivité. De plus le problème de la pondération apparaît une fois encore dès lors qu'on veut juger globalement le phénomène en faisant intervenir à la fois plusieurs caractères du sol.

Une technique astucieuse consiste à calculer non pas directement la variabilité globale du sol, mais sa résultante, la variabilité du rendement en blé par exemple (Callebaut et de Leenheer, 1966). Cette mesure, qui est évidemment particulière, se justifie préalablement à l'installation de champs d'essais.

La forme des courbes de fréquence liées à la variabilité est importante à considérer (par exemple : nombre de profils d'une unité ayant un pH compris entre 4 et 5, 5 et 6, 6 et 7, etc...). En effet, dans beaucoup de calculs statistiques la répartition est supposée Normale (loi de Gauss) et aucune vérification n'est entreprise, souvent parce qu'on n'a pas assez de données pour apporter une preuve, dans quel sens que ce soit.

Les travaux portant sur ces problèmes sont peu nombreux, à l'heure actuelle surtout (Makhlin, 1973 ; Vintila et Canarache, 1974). De ce fait, il n'est pas sûr que leur portée soit générale, car ce qui est vrai pour un type de sol est peut être faux pour un autre.

Quoi qu'il en soit, notons que la plupart des données analytiques utilisées en pédologie sont des pourcentages (valeurs ramenées à 100 g de terre). Les chiffres sont donc nécessairement compris entre 0 et 100, et non pas entre moins et plus l'infini, comme c'est le cas dans une vraie répartition normale ; en particulier la loi de Gauss est très loin d'être vérifiée lorsque la moyenne s'éloigne nettement de 50 p. 100 (Legros, 1973-2, p. 31, fig. E).

En dépit des difficultés ci-dessus évoquées, un certain nombre d'idées générales se dégagent globalement des travaux analysés :

— la variabilité est moins liée qu'on ne pourrait le penser à la nature du sol, au type de cartographie, à la qualification du pédologue. Elle semble surtout dépendre du type de caractère testé. En effet les variations de certaines propriétés, qui servent de critère de délimitation des sols sont assez bien perçues par le pédologue (texture, profondeur...) et donc prises en compte lors de la cartographie. En revanche les variations d'autres caractères, certaines propriétés chimiques en particulier, ne peuvent être saisies directement (c'est le cas pour N, P, K dont les valeurs sont liées à la fertilisation). Aussi la validité de la cartographie est plus faible en ce qui les concerne. A la limite la variation dans les unités peut être aussi grande ou plus grande que la variation entre les unités. Pour le caractère considéré, l'intérêt de la cartographie est alors nul. Le tableau suivant fournit quelques exemples de relations « caractère-variabilité » :

Coefficients de variation dans l'unité pédologique
d'après : Bascomb et Jarvis, 1976 ; Val'kov *et al.*, 1975

	Fractions granulo.	$CaCO_3$	pH	CE	Da	P_2O_5	Epaisseur horizon
CV	10-25 p. 100	20-300 p. 100	5-15 p. 100	14-20 p. 100	10 p. 100	25-150 p. 100	20-30 p. 100

— la variabilité n'est pas liée de manière nette à la profondeur d'échantillonnage (Cameron *et al.*, 1971),

— elle perd sa signification pour les caractères qui correspondent à des valeurs numériques proches de zéro en moyenne (cf. $CV = s/\bar{x}$),

— à l'intérieur d'un milieu considéré comme homogène, au plan cartographique, elle s'accroît peu avec la distance. Aussi deux pédons voisins sont souvent aussi différents, ou presque, que d'autres séparés par 1 ou 10 km. On a montré, par exemple, qu'en terrain cultivé, dans un carré de 5,5 m $\times$ 19 m, les variations de teneurs en N, P, K pouvaient être les suivantes (Briggs, 1974) :

N de 1 à 10 fois,
P de 1 à 2 fois,
K de 1 à 2 fois.

f) *Autres méthodes*

Quelques méthodes ont été développées qui se placent à mi-chemin entre le contrôle de la pureté et celui de la variabilité. Ceci montre combien ces notions sont liées et combien il est difficile de lever toute ambiguïté.

Le calcul du contraste (Amos et Whiteside, 1975). Les auteurs partent des normes suivantes :

0 = pas de contraste = sols de la série de référence,
1 = faible contraste = sols d'étroite ressemblance,
2 = contraste moyen = sols de quelque ressemblance,
3 = contraste fort = sols de faible ressemblance.

Dans le cas précis, la ressemblance est définie par rapport à la texture et au drainage.

Si 100 p. 100 des contrôles permettent d'observer des sols qui ne présentent aucune différence avec ceux signalés dans la légende, la valeur pondérée du contraste vaut $100 \times 0 = 0$. Si, au contraire, la différence est maximum entre les sols observés et ceux qu'on aurait dû trouver, on peut théoriquement atteindre la valeur $3 \times 100 = 300$.

D'après les auteurs, un contraste supérieur à 100 (ce qui correspond par exemple à un tiers d'observations erronées) autorise à douter de la validité de la carte.

La mesure du contraste est réalisée en référence à la légende (comme pour la pureté) mais une sorte de distance moyenne à un type est introduite (comme pour la variabilité).

Un autre type de méthode, qui vise à étudier simultanément la précision des limites et la pureté, consiste à se demander dans quelle mesure la carte déjà tracée, serait altérée si on cherchait à la reconstituer à partir de x p. 100 des observations seulement (cartographie par maille).

Cette façon de procéder ne permet évidemment pas de vérifier la validité de la carte considérée, qui justement sert de référence, mais fournit des enseignements pour les travaux futurs, en particulier dans le domaine de la cartographie assistée par ordinateur. Les résultats sont parfois très curieux. On a pu montrer ainsi, dans un cas bien précis (Mausel *et al.*, 1970-1) que 2 p. 100 de l'information initiale suffisait pour identifier correctement, sur 64 p. 100 de la surface, les deux types de sols dominant (associations). Ceux-ci sont naturellement considérés à un niveau relativement élevé de la classification. Pour ces travaux, les méthodes de comparaison entre la carte originale et les cartes dérivées, sont celles déjà exposées plus haut.

Dans le même esprit, on peut demander à des pédologues qui n'ont pas participé à une prospection de reconstituer la carte des sols au laboratoire, en disposant simplement de la légende, du rapport, de photographies aériennes dépourvues de toute indication (Valentine *et al.*, 1971). La précision est estimée par la proportion de sites de référence qui ont été correctement identifiés. Cette méthode fournit une indication sur ce que peut être la validité d'une cartographie de reconnaissance type « physiographic mapping » (cf. annexe sur les méthodes).

g) *Discussion*

Quelle que soit la façon de prendre le problème, on arrive souvent au même résultat : les impuretés sont nombreuses et la variabilité importante ; même la précision des limites ne peut pas être excellente dans tous les cas. Si le cartographe et l'échelle peuvent être localement responsables de cela, il est évident que c'est la struc-

ture même du manteau pédologique (degré de différenciation des sols, répartition) qu'il faut incriminer en général. La carte n'est qu'un modèle approximatif d'une réalité complexe et ceci doit être clairement entendu du spécialiste et de l'utilisateur.

Le spécialiste devrait préciser chaque fois la pureté de ses unités de sols et indiquer, si possible, leur variabilité. Ceci se pratique couramment à l'étranger mais pas encore en France. L'utilisateur doit admettre que la carte n'est pas fiable à 100 p. 100 et qu'elle n'indique que grossièrement la répartition des sols. Dans ce contexte, les documents les meilleurs sont ceux dont la notice et la légende lui permettent de comprendre la logique de la répartition des sols et donc d'affiner, le cas échéant, le schéma proposé par le cartographe.

à suivre.

Summary

Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography. Bibliographical review

I. — *Precision in the soil pattern*

Data processing and statistics have been widely used for several years in pedological cartography. Very numerous publications attest it. The main objects are the following ones : to improve the coherence and validity of the cartographic methodology, check the precision and provide us with the means to estimate the importance of the field works necessary in different cases. A synthesis mainly based on the researches carried out abroad, in the United Kingdom and United States in particular, is proposed. In a first part described here under are faced :

— the choice of cartography criteria. An important attempt seemed to have been made to check the validity of the choice of the cartography criteria because the latter condition the meaning of the map ;

— the precision at mapping delineation level. The works relative to this problem of prime importance are numerous but the notions of purity, variability and limit precision are not always clearly discerned. An attempt for a better classification and definition was made and a description of the testing method is given.

In a joint document the different methods of pedological cartography are indexed and synthetized so as to reach a better understanding of the text.

The bibliography will be enclosed in the second part of the publication.

Zusammenfassung

Suche nach und numerische Kontrolle der Prazision in Bodenkartographie. Bibliographische Untersuchung

I. — *Prazision in der Bodenabgrenzung*

Seit einigen Jahren sind automatische Datenverarbeitung und Statistik in der Bodenkartographie weitgehend benutzt worden. Sehr viele Veröffentlichungen bestätigen dies. Die Hauptzwecke sind folgende : den Zusammenhang und die Gültigkeit der kartographischen Logik zu verbessern, die Präzision zu kontrollieren, und die Mittel zur Schätzung der Bedeutung der in so einem speziellen Fall nötigen Geländearbeiten zu liefern. Eine Synthese, die sich hauptsächlich auf die im Ausland, im Vereinigten Königreich und in insbesonders den Vereignigten Staaten, durchgeführten Forschungen beruht, wird vorgestellt. In einem ersten hier beschriebenen Teil werden betrachtet :

— die Wahl der Kartographiekriterien. Es scheint, dass ein wichtiger Versuch gemacht wurde, um die Gültigkeit der Wahl von Kartographiekriterien zu kontrollieren, denn die letzten bedingen die Aussage der Karte ;

— die Präzision in der Zoneneinteilung. Die Werke bezüglich dieser wesentlichen Frage sind zahlreich, aber die Begriffe von Klarheit, Veränderlichkeit und Grenzenpräzision sind nicht immer

klar erkannt. Ein Versuch zur Klassifizierung und Erklärung zusammen mit einer Vorstellung der Kontrollmethoden wird gemacht.

In der Anlage sind die verschiedenen Methoden in Bodenkartographie ins Register aufgenommen und zusammengefasst, um zum Gesamtverständnis des Textes beizutragen.

Die Bibliographie wird dem zweiten Teil der Veröffentlichung beigefügt.

РЕЗЮМЕ

Исследование и числовой контроль точности педологическои картографии. Библиографическое изучение. Точность разграничения почв

ЛЕГРО Ж. П.

Информатика и статистика применяются очень широко вот уже в течении нескольких лет в педологической картографии, о чем свидетельствует существующая по этому вопросу обширная библиография. Главная цель их прменения, следующая : улучшение связности и подлинности картографической логичности, контроль точности, предоставка средств для оценки важности грунтовых работ, необходимых в каждом отдельном случае. Предлагается синтез основывающийся главным образом на заграничных исследованиях, в особенности английских и американских. В первой части нашей работы рассматриваются :

— выбор картографических критериев. Очень крупное усилие было, кажется, приложено для проверки законности выбора этих критериев, обуславливающих значение карты ;

— точность разграничения. Работы посвященные этому основному вопросу многочисленны, но понятия чистоты, изменчивосии и точности разграничения не всегда различаются ясно. Прилагаются усилия для классификацаи и определения, и в то-же время рассматриваются методы контроля.

В приложении фигурируют репертуар и сиетез методов педологической картографии для облегчения общего понимания текста.

(1) Библиография будет приложена ко второй части работы.

ANNEXE A

Les différentes méthodes de cartographie pédologique

Il existe différentes méthodes permettant d'établir une carte de sols. Prétendre que l'une est meilleure, et qu'en conséquence il n'est nécessaire ni de réfléchir à cette question, ni de jamais changer de technique, est absurde. En fait, chaque méthode a ses conditions optimales d'exploitation en fonction du milieu, de l'échelle, de l'objectif. Savoir utiliser la meilleure, dans un cas donné, peut améliorer le rapport qualité/coût.

Difficile à traduire sans longues périphrases la terminologie originelle définie par nos collègues de langue anglaise Steur et Buringh (voir Beckett, 1968 ; Mabbutt, 1968) a été maintenue d'autant plus que son sens est clair.

A. — Free survey (Cartographie libre)

Concepts équivalents ou voisins : Soil Class Mapping, Cartographie de séries, parametric approach.

Principe scientifique de base

Démarche expérimentale classique avec données → hypothèses → contrôle → généralisation. C'est une méthode par INDUCTION.

Les principales phases du travail se déroulent dans l'ordre suivant :

1) Choix des *critères* de cartographie, reconnaissance et définition de type de sols cartographiables.

2) Recherche des lois de distribution des sols dans le paysage et *délimitation* de ceux-ci. Utilisation de sondages et d'observations de surface dont l'emplacement est librement et logiquement choisi.

3) Caractérisation fine des sols au moyen de profils *implantés* dans des secteurs estimés typiques.

Avantages

Rapidité, quantité d'information nécessaire limitée, bien adaptée aux échelles comprises entre le 1/25 000 et le 1/100 000.

Inconvénients

L'échantillon est biaisé, on ne peut estimer la pureté et la variabilité des caractères. Exige la compréhension du paysage. Manque de logique puisque les sols sont délimités avant d'être caractérisés en détail.

B. — Grid survey (Cartographie par grille)

Principe scientifique de base

INTERPOLATION des limites ou si on préfère DÉDUCTION des limites.

Phases du travail :

1) *Profils* ou observations implantés aux nœuds d'une grille régulière,
2) Choix des *critères* de délimitation des sols,
3) *Délimitation* des sols par interpolation.

Avantages

Calculs statistiques possibles et utilisation de l'ordinateur aisée, même pour le tracé des limites. Bien adaptée à grande et à très grande échelle et chaque fois que les limites de sol ne s'inscrivent pas clairement dans le paysage (forêt par exemple). L'information acquise au niveau des profils reste utilisable pour :

— refaire d'autres cartes en changeant simplement de critères de délimitation,
— refaire une carte à plus grande échelle en positionnant des informations intermédiaires entre les précédentes.

Ne nécessite pas au même degré que la précédente une main-d'œuvre très qualifiée.

Inconvénients

Longue, coûteuse, fastidieuse.

C. — Physiographic mapping (Cartographie physiographique)

Voir aussi : Land Unit Mapping, landscape approach, synthetic approach API (Air Photograph Interpretation), rapid soils mapping.

Principe scientifique de base

Dans le cas général, il n'y a pas bijection (correspondance type par type) entre l'ensemble des sols et celui des environnements. D'où, deux solutions (Legros, 1975) :

— partir des sols et établir la liste des environnements compatibles afin d'aider à la délimitation des premiers. C'est la démarche classique utilisée en Free Survey,
— partir des environnements et caractériser chacun des sols qu'on peut y rencontrer. C'est le système utilisé en Physiographic mapping.

Les différentes phases du travail sont donc les suivantes :

1) Délimitation d'unités de paysage (en général au moyen de photographies aériennes et de cartes topographiques, géologiques...),
2) Inventaire sur le terrain des types de sols représentés dans ces unités.

Avantages

Très efficace à très petite échelle (1/1 000 000 et au-delà), peu coûteux, limites non remises en cause par un changement dans la classification de référence.

Inconvénients

Intérêt surtout didactique, suppose qu'il existe, à l'échelle considérée, des liaisons nettes et stables d'une part entre les divers caractères de l'environnement (= il existe des paysages), d'autre part entre ces paysages et les sols (= les cartes sont efficaces pour la prédiction des types de sols).

D. — Autres méthodes

Pour pallier les défauts scientifiques de telle ou telle méthode, diverses solutions intermédiaires ont été proposées et testées par des pédologues expérimentés :

Quantitative Soil Survey (Rudeforth, 1969)

Combine la cartographie physiographique et la cartographie par grille. Les unités de paysage sont délimitées pour une large part au moyen de photographies aériennes, puis elles sont explorées en détail au moyen d'observations réalisées suivant une grille intéressant l'ensemble de la carte. Ceci permet de dresser, pour chaque unité, la liste des types de sols avec leur proportion.

Avantages.

Limites implantées logiquement et rapidement, variabilité des sols mesurée, distinction claire entre unités cartographiques et unités taxonomiques. Méthode sûre et efficace.

Inconvénients.

Légère perte de précision par rapport au Free Survey.

Computer Area Mapping (Ragg, 1977)

Combine la cartographie libre et la cartographie par grille. La moitié des profils ou sondages nécessaires sont implantés aux nœuds d'une grille régulière. La position de l'autre moitié des observations est librement choisie par le cartographe, en fonction de la complexité locale de la répartition des sols.

Avantages.

Allie la logique d'une cartographie libre à la rigueur d'une cartographie par grille. Prévue pour l'enregistrement sur ordinateur.

Inconvénients.

Contraintes de la cartographie par grille mais atténuées.

Méthode du service de cartographie des sols de l'Aisne
(Jamagne, Maucorps *et al.*, 1964 à 1972)

Combine également la cartographie libre et la cartographie par grille. Une maille régulière est tracée, puis, dans chaque surface élémentaire une observation est réalisée, l'emplacement de cette dernière étant librement choisi à l'intérieur du cadre ainsi défini.

Avantages.

Rigueur, représentation analytique facilitée, enregistrement sur ordinateur possible sans contraintes importantes.

Inconvénients.

Identiques à ceux de la méthode précédente.

ANNEXE B

Les symboles suivants sont utilisés. Leur définition n'est fournie dans le texte que lors de leur premier emploi.

CV = Coefficient de variation.
e = Erreur en p. 100.
E = Echelle de la carte.
N = Nombre d'échantillons de terre pris en compte.
P ou p = Nombre de profils.
s = Ecart type
S = Surface de la carte en hectares.
U = Nombre d'unités pédologiques.
BPM = Best Possible Map = Carte de contrôle.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 521-524.

Chronique de livres

LAMB H. H. — *Climate, present, past and future*. Vol. 2, Climatic history and the future. Methuen & C° Ltd, London, 835 p., 1977.

De tous temps, l'homme s'est préoccupé du climat et de ses variations. Notre époque connaît une recrudescence d'intérêt pour ce problème et l'on s'interroge pour savoir comment le temps va évoluer dans les années et les siècles à venir, soit à cause des inéluctables lois naturelles, soit par suite de l'action volontaire ou non de l'homme.

Ce volume permet de faire le point des connaissances en ce domaine en 1977. Outre de nombreuses tables et figures illustrant les données exploitées jusqu'à ce jour, une abondante revue bibliographique (87 p.) permet d'approfondir les sujets qui nous intéressent. Dans une première partie, l'auteur passe en revue toutes les méthodes qui permettent de mettre en évidence et de dater les variations climatiques depuis l'échelle séculaire (on dispose de quelques séries de 300 ans de mesures climatiques) jusqu'à un million d'années, en passant par les périodes historique, post-glaciaire et interglaciaire. Les méthodes biologiques : dosage du C^{14}, mesures des anneaux de croissance des arbres... sont souvent utilisées. L'étude de ces variations climatiques permet de mettre en évidence des cycles de périodes variées de 10 à 100 000 ans souvent expliquées par les positions relatives du Soleil et de la Terre. Ces cycles permettent d'envisager des prévisions à long terme dont le principe d'étude est abordé dans le dernier chapitre (la prévision à courte et moyenne échéances est traitée dans le premier tome paru en 1972). Ce chapitre, avec son annexe, n'a que 38 pages ; comme le regrette l'auteur à plusieurs reprises, peu de crédits sont en effet affectés à ces recherches pourtant importantes pour l'économie mondiale. Cependant, on ne peut manquer d'être frappé, à la lecture de ce livre, de la différence d'échelle entre le passé et l'avenir : une prévision à 24 h est à peu près aussi précise que la connaissance du climat il y a un siècle ; à la même échelle, une prévision à un an d'échéance correspond à 35 000 ans. Nous savons qu'à cette époque il faisait beaucoup plus froid que maintenant ; or la stratégie d'un agriculteur serait différente s'il connaissait avant les semis le caractère de la saison de végétation, même avec une faible précision comme chaud, normal ou froid.

Le chapitre sur l'action de l'homme sur le climat analyse les grands projets de modification du climat sur une grande échelle ; mais il traite surtout de l'action involontaire de l'homme par les divers types de pollution qui eux aussi peuvent agir sur le climat à venir.

R. D.

KELLOGG William W. — *Effects of human activities on global climate*. Technical note n° 156, World Meteorological Organization, WMO n° 486, Genève (Suisse), 1977.

Si la modélisation des systèmes climatiques ne permet pas actuellement une prévision de l'évolution naturelle du climat, elle peut toutefois servir à évaluer comment le climat réagira à une modification donnée d'une ou plusieurs des conditions externes des modèles.

A l'aide de modèles plus ou moins complexes, l'influence des activités humaines est évaluée et en particulier :

— l'effet de l'augmentation de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère ;
— les conséquences d'autres phénomènes : aérosols, gaz absorbants le rayonnement infrarouge, pollution thermique, ...

Avec une incertitude de facteur deux, les différentes études montrent que la température moyenne de la terre s'élèvera de 1 °C d'ici l'an 2000. Cela représenterait le plus grand changement climatique observé au cours du millénaire écoulé.

Etant donné l'importance de ces phénomènes, un dernier chapitre présente les axes de recherche qui doivent être développés à la fois pour une meilleure compréhension des mécanismes, mais aussi pour une réduction des effets de l'activité humaine.

Une bibliographie très importante complète cette note technique qui permettra aux lecteurs intéressés de faire le point dans ce domaine présenté souvent de façon trop partielle.

R. B.

LEMÉE G. — *Précis d'écologie végétale*. Collection Maîtrises de Biologie. Masson, Paris, 280 p., 1978.

Ce manuel réunit l'essentiel des connaissances actuelles sur l'Ecologie du monde végétal.

L'Ecologie végétale a ses racines dans la conjonction des trois courants de recherches qui se sont développés au siècle dernier : la géobotanique, l'agronomie et la physiologie végétale.

Depuis une vingtaine d'années, l'Ecologie prend un grand essor, sous l'impulsion conjointe d'un concept fécond, de techniques nouvelles et de problèmes socio-économiques graves.

A ceux qui ont la charge de gérer les ressources naturelles ou d'étudier des problèmes de société, l'écologie propose une information objective fondée de plus en plus sur des données quantitatives et expérimentales.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants, mais aussi aux professionnels confrontés aux problèmes de production végétale, d'aménagement ou de protection des sites.

Plan de l'ouvrage :

I. — Les niveaux d'étude en écologie.

II. — Caractères généraux des milieux naturels et de leur action sur les végétaux : — Caractères généraux de l'environnement — Caractères généraux des modes d'action de l'environnement sur les végétaux — Action sélective de l'environnement — Action de l'environnement sur la dynamique des populations végétales. Notions de station et d'habitat.

III. — Les facteurs énergétiques de l'environnement et leurs actions : — Flux et bilans radiatifs dans la biosphère — Le rayonnement visible et son importance biologique pour les végétaux — La température et son action.

IV. — Facteurs hydriques : — Aspects physiques des états et de la circulation de l'eau dans la biosphère — Etats et circulation de l'eau dans le sol — Etats et circulation de l'eau dans l'atmosphère — Circulation de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère — Réactions et adaptations des végétaux aux conditions hydriques du milieu — Caractères hydriques stationnels et bilan de l'eau dans les éco-systèmes — Le cycle hydrologique de la biosphère.

V. — Facteurs chimiques : Caractères généraux des échanges chimiques entre les végétaux et les milieux extérieurs — Etats et actions spécifiques des bioéléments majeurs — Les oligoéléments dans les milieux naturels et leur action écologique — Les sols salés et les halophytes — Le pH du sol et ses relations avec les plantes et la microflore.

VI. — Facteurs biotiques : — La compétition — Actions par émission de substances dans le milieu — Exploitation par prédation et parasitisme — Commensalisme et coopération — Le facteur humain.

VII. — Les végétaux et la pollution : — Caractères généraux des pollutions et de leurs actions — Pollution atmosphérique — Pollution des sols — Pollution des eaux — La pollution par les éléments radio-actifs.

VIII. — Les végétaux dans l'écosystème : — Les végétaux autotrophes — Les végétaux hétérotrophes : la microflore du sol — La matière organique du sol — Productivité nette globale des écosystèmes — La circulation des éléments nutritifs dans l'écosystème : cycles biogéochimiques.

IX. — Dynamique et évolution des communautés végétales : — Méthodes d'étude de l'évolution des communautés végétales — Facteurs et mécanismes des modifications des communautés — Successions des communautés végétales — La stratégie de la succession des écosystèmes.

X. — Les végétaux dans la biosphère : — La production primaire mondiale — Les grands types d'écosystèmes de la biosphère — La production végétale face aux besoins de l'homme : aspects écologiques — Aspects phytoécologiques de l'aménagement de la biosphère.

Bibliographie pour chaque chapitre — Index alphabétique.

M.-C. D.

MERCIER J. R. — *Energie et Agriculture, le choix écologique*. Ed. Debard, Paris, 193 p., 1978.

On sait que depuis quelques années, à la suite des travaux de l'américain Pimentel, l'attention de l'opinion publique est régulièrement attirée sur la détérioration du rendement énergétique de l'agriculture « industrielle », le rendement énergétique étant défini comme la quantité de calories alimentaires produites avec une calorie d'énergie fossile.

L'ouvrage de J. R. Mercier est d'abord un recueil bien structuré de données françaises et étrangères relatives à la consommation d'énergie dans le système agro-alimentaire. De ce point de vue il constitue un document de référence utile à tous ceux que préoccupe le développement à long terme de la production agricole.

Mais le livre est aussi l'illustration d'une thèse, celle de l'« Agriculture biologique ». Il est de ce point de vue moins convaincant et ceci indépendamment de l'opinion que l'on peut avoir à propos de cette dernière. En effet la consommation croissante d'énergie fossile dans la production agricole industrialisée ne constitue pas le plus solide argument en faveur de l'agriculture biologique. Tout d'abord parce que, même si l'on admet la combinaison discutable de calories « alimentaires » et de

calories « énergétiques », la notion de rendement énergétique (output/input) n'estompe pas celle de marge nette énergétique (output-input). Or les données regroupées dans l'ouvrage font toutes apparaître une amélioration de la marge nette au cours des 30 dernières années, au moins pour la céréaliculture industrielle. Par ailleurs, le rôle des sous-produits est souvent négligé alors qu'il suffit parfois d'utiliser une partie d'entre eux à des fins énergétiques pour rembourser intégralement l'input, y compris celui correspondant à la fabrication des engrais ; c'est le cas de la paille notamment. Par ailleurs, il est clair que la dégradation du rendement énergétique à un niveau plus global est fortement reliée d'un côté à la part croissante des produits animaux dans l'alimentation et d'un autre côté à l'ensemble des opérations en aval de l'agriculture proprement dite, problèmes qui ne constituent pas la cible privilégiée des tenants de l'agriculture biologique au moins pour le premier d'entre eux.

Le développement néanmoins souhaitable d'une agriculture à « valeur ajoutée biologique maximale » pour reprendre l'expression de Jacques Poly se justifie plus facilement à partir de considérations non énergétiques. En effet, l'agriculture industrielle actuelle peut conduire dans ses excès à :

— une fragilité économique grandissante liée à l'accroissement du coût des facteurs de production ;
— une réduction excessive de la population active en milieu rural ;
— une pollution croissante des eaux en particulier des nappes aquifères ;
— une mauvaise valorisation des sous-produits ;
— une détérioration de la qualité de certains produits alimentaires.

Par ailleurs on regrettera que l'auteur connaisse fort mal certains travaux de l'INRA qui vont pourtant dans le sens qu'il prêche (lutte biologique, recherche de variétés résistantes aux maladies, analyse énergétique de la production agricole, fermentation méthanique, etc....).

Malgré ces réserves « Energie et Agriculture, le choix écologique » est un livre passionnant et documenté dont la lecture est vivement conseillée.

P. C.

POSPISILOVA J. et SOLAROVA J. — *Water in plants bibliography*. Vol. 2, 1976, Références n° 980, 2479/ABA-ZVE. Dr. W. Junk Publ. The Hague, 1978, 129 p.

Ce volume n° 2 fait suite au volume n° 1 sorti l'année dernière, Il s'agit d'une bibliographie couvrant pratiquement tout le domaine des relations plante-eau qu'un groupe de chercheurs de l'Institut de Botanique Expérimentale de Prague établit chaque année. Ce volume couvre la littérature parue en 1976 et comprend 1 500 références, soit plus de 50 p. 100 d'augmentation par rapport au précédent. Cette augmentation n'est pas tant due à une meilleure « couverture » de l'ensemble des publications qu'à une augmentation du nombre de celles-ci. Les références numérotées de 980 à 2 479 prennent donc la suite des 979.

On retrouve dans ce volume la même disposition que dans le volume précédent, à savoir :

— un index auteur ;
— un index matière établi non seulement à partir du titre, des mots-clé et du résumé, mais aussi du contenu de tout l'article ;
— un index par plantes (entrées au nom anglais et latin) où figurent les plantes cultivées importantes et un certain nombre de taxons.

Souhaitons que ce précieux outil de travail puisse être largement connu.

P. C.

MAYBANK J. — *The scientific planning and organization of precipitation enhancement experiments, with particular attention to agricultural needs*. Technical note, n° 154, WMO, n° 478, Genève (Suisse), 1977.

Cet ouvrage situe les différents problèmes posés par l'augmentation artificielle des précipitations.

Le premier chapitre présente les travaux réalisés jusqu'à ce jour et les difficultés d'appréciation des modifications climatiques. Les besoins d'augmentation de la pluviométrie dans le domaine agricole sont ensuite discutés après un rappel des différents modèles agrométéorologiques pouvant être utilisés pour évaluer l'impact d'éventuelles modifications de la quantité et de la fréquence des pluies.

Puis les potentialités d'augmentation des précipitations sont abordées en tenant compte :

— des ressources en eau de l'atmosphère,
— de la nécessité de réaliser des expériences préliminaires soigneusement contrôlées sur le plan statistique en particulier,
— des possibilités de réalisation et du coût d'opérations d'ensemencement des nuages.

Une bibliographie avec un regroupement par thèmes (historique, influence de la pluie sur la production agricole, physique des nuages, ...) complète cette mise au point.

R. B.

BAIER Wolfgang. — *Crop-weather models and their use in yield assessments*. Technical note n° 151, WMO, n° 458, Geneva (Suisse), 1977, 48 p.

Cette note expose les méthodes dont on dispose actuellement pour simuler et analyser les réactions des plantes cultivées aux conditions météorologiques. Une attention particulière est portée aux modèles statistiques d'évaluation de la production de blé d'une région.

Après une introduction sur la situation mondiale de la production des céréales, l'auteur discute successivement :

— des modèles de simulation de la croissance des couverts végétaux (ELCROS : Pays-Bas, SPAM : USA, ...) ;

— des modèles d'analyse du développement des cultures en fonction des seules conditions météorologiques (en particulier les travaux de G. W. Robertson et W. Baier) ;

— des modèles basés sur des relations statistiques empiriques entre production et facteurs climatiques ou caractéristiques du sol.

L'auteur passe ensuite en revue, pays par pays, les modèles, du type à régression, disponibles pour évaluer les rendements du blé.

Il faut noter l'absence de référence à des travaux de langue française.

R. B.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mèmoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 3-1979

Dépôt légal : 1er trimestre 1979. N° d'impression : 26156

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F — Le numéro : France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... 230,00 F

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... 55,00 F

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... 300,00 F

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... 80,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... 53,50 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... 53,50 F

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... 52,00 F

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... 35,00 F

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... 150,00 F

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... 150,00 F

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... 85,00 F

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... 58,85 F

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... 120,00 F

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... 160,50 F

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1978, **29** (5), 421-524.

Table des matières

Nicole SOUTY. — Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières de sols calcaires 421

Ch. M. BALDY. — Utilisation d'une relation simple entre le bac classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'ETP en zone soudano-sahélienne 439

Georgette RISSER, P. CORNILLON, J. C. RODE, Magali AUGE. — Effet de la température des racines sur la croissance de jeunes plants de diverses variétés de Melon (*Cucumis melo* L.) .. 453

Etudes bibliographiques :

Agnès HUBERT. — Relations entre la conductivité hydraulique et la structure des milieux poreux 475

J. P. LEGROS. — Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I. — Précision dans la délimitation des sols 499

Chronique de livres 521

Contents

Nicole SOUTY. — First contribution to the study of the specific physical and mechanical characteristics of calcareous soils 421

Ch. M. BALDY. — Use of a simple relation between US class A evaporation pan and Penman's formula to estimate potential evapotranspiration in soudano-sahelian countries 439

Georgette RISSER, P. CORNILLON, J. C. RODE, Magali AUGE. — Influence of root temperature on plant growth of various musk-melon cultivars (*Cucumis melo* L.) 453

Bibliographical reviews :

Agnès HUBERT. — Relationships between the hydraulic conductivity and the structure of porous media 475

J. P. LEGROS. — Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography. I. — Precision in the soil pattern 499

Books review 521

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 8-036-005-5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29 . N° 6

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 29 (6) 525-644 (1978)
FR ISSN 0003-3839.

AAG
29.6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris-Grignon, Paris Cedex 05.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1978

Vol. 29. N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1978, **29** (6), 525-539.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Température nocturne et photosynthèse

I. — Etude bibliographique

J. J. LONGUENESSE

Station de bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
Domaine Saint-Paul, 84140 *Montfavet*

Résumé

Les arrière-effets, à différentes échelles, du climat sur les échanges gazeux des végétaux peuvent fournir des informations précieuses sur leur fonctionnement. La température nocturne a été choisie en raison de l'importance de ce problème, tant dans une optique de modélisation que pour la pratique des cultures sous serre. Son action est replacée dans le cadre des différents arrière-effets de la température : influence des conditions de croissance, thermopériodisme. On a surtout trouvé dans la littérature des informations sur l'inhibition de l'assimilation par les nuits froides. Deux types de mécanismes sont en général proposés : déficit hydrique au lever du jour (plutôt pour les plantes C_3) ou accumulation d'assimilats bruts dans les feuilles (surtout plantes C_4) ; ces mécanismes correspondent à l'action de la température sur les mouvements d'eau dans la plante, d'une part, et d'autre part sur le transfert et la transformation des assimilats.

Introduction

La température est un facteur important de la croissance et du développement de la plante. Elle influence en effet la quasi-totalité de ses fonctions physiologiques, soit directement, soit indirectement par le jeu des interactions entre ces fonctions. Parmi celles-ci, la photosynthèse est le processus primaire de production à partir duquel la croissance de la plante est possible.

Si ses variations en fonction des différents paramètres de l'environnement diurne ont été bien étudiées, l'influence de l'amplitude nycthémérale de température n'a jusqu'à maintenant suscité que peu de travaux. Or le climat nocturne, en plus de son action directe sur la respiration (Penning De Vries, 1972 ; Mc Cree, 1974), conditionne également des phénomènes comme le transfert des assimilats et la mise en place de nouveaux tissus (Went et Hull, 1949, Bohning, Kendall et Linck, 1953 ; Bendix et Went, 1956 ; Hussey, 1965) qui, chez de nombreuses plantes, ont lieu essentiellement la nuit (Went et Hull, 1949 ; Madsen, 1968) et conditionnent ensuite l'assimilation ultérieure (Hussey, 1965). La connaissance des mécanismes d'action de la température nocturne sur la photosynthèse permettrait donc d'élucider certaines des liaisons entre fonctions physiologiques du végétal. De plus il est nécessaire de faire

intervenir cette action dans les essais de modélisation analytique de la croissance. Les résultats des modèles actuellement élaborés, qui n'en tiennent pas compte par manque de données utilisables, sont souvent en contradiction avec la réalité expérimentale (Van Bavel, Damagnez, Comm. Pers.).

Sur un plan plus pratique, dans le cas des cultures sous serre, la maîtrise des températures nocturnes par le chauffage et des températures diurnes par le refroidissement et/ou la ventilation, fixe des valeurs de consigne de jour et de nuit qui sont en partie imposées par le coût de la consommation énergétique qu'elles entraînent. Une meilleure connaissance de l'influence du climat nocturne permettrait d'optimiser à la fois cette dépense énergétique et la production.

Avant de réaliser une étude expérimentale sur les relations entre température nocturne et photosynthèse diurne, il est apparu nécessaire, compte tenu de la diversité des phénomènes mis en jeu, de faire le point des travaux réalisés sur le sujet.

Le premier chapitre de cet article présente rapidement quelques travaux relatifs aux arrière-effets de la température sur l'assimilation.

Le chapitre II est consacré aux études portant sur l'action de la température nocturne proprement dite.

Le chapitre III analyse les mécanismes d'action proposés, et leur validité dans le cadre général de la physiologie de la plante.

En conclusion, les perspectives de recherches concernant ce phénomène, ainsi que ses implications pratiques, seront évoquées.

I. — Arrière-effets de la température sur les échanges de CO_2

1. — *Température subie pendant la période d'élevage*

Hesketh (1968), Peet *et al.* (1977) sur le Haricot, Mooney et Harrison (1970) Treharne et Nelson (1975) sur la Fétuque observent que l'assimilation nette, mesurée en conditions standard, augmente avec la température subie pendant la croissance, entre 10 et 25 à 30 °C ; ils attribuent ces différences à des modifications de la respiration (Mooney et Harisson, 1970 ; Peet *et al.*, 1977) et de l'ouverture stomatique (Peet *et al.*, 1977). Kishitani et Tsunoda (1974) obtiennent des résultats similaires sur le Riz avec un prétraitement de quelques jours seulement à 17/12 °C et 30/25 °C. Björkman (1975) observe que la réponse de l'assimilation des plantes aux facteurs climatiques dépend de façon complexe de leur type métabolique (C_3 ou C_4), de leur origine écologique, et des conditions, en particulier thermiques, de leur croissance ; en particulier l'optimum de température augmente avec la température subie pendant la croissance (Mooney et Harisson, 1970 ; Björkman, 1975).

2. — *Thermopériode*

Un des premiers auteurs ayant observé de façon systématique l'effet de l'alternance de température jour-nuit est Went, étudiant l'élongation de la tige de Tomate. Il observe que « le fait pour une plante d'être soumise à des températures diurnes et nocturnes différentes donne une meilleure croissance que l'application de n'importe

quelle température constante » et donne cette définition du thermopériodisme : « La croissance optimale est obtenue lorsque la température de la période obscure est inférieure à celle de la période de lumière » (Went, 1944). En faisant référence à ses travaux sur les transferts d'assimilats, poursuivis par la suite (Went et Hull, 1949 ; Bendix et Went, 1956), il explique ce phénomène par l'existence de températures optimales différentes pour les fonctions diurnes (assimilation du CO_2 à optimum élevé) et nocturnes (transfert des assimilats à optimum bas). En fait, les travaux de Went ne permettent pas de conclure sur le problème du thermopériodisme chez la Tomate : d'une part l'interprétation qu'il donne de ses observations sur les transferts d'assimilats est controversée (Hewit et Curtis, 1948), d'autre part ses résultats sur la croissance prêtent à confusion : outre le fait qu'il mesure une élongation et non une augmentation de poids, ce qui ne permet pas d'en tirer des informations concernant l'assimilation nette, les différents traitements appliqués sont difficilement comparables entre eux : par exemple certains effets observés peuvent aussi bien s'expliquer par les différences entre durée de la thermo- et de la photopériode, que par une action thermopériodique.

Mis à part ces travaux, qui représentent une somme d'informations considérable, mais d'exploitation difficile, il existe peu d'articles publiés concernant le phénomène du thermopériodisme. Friend et Helson (1976) en donnent une définition précise, limitée à la comparaison de différentes amplitudes thermiques (positives, négatives ou nulles) pour une même température moyenne ; ils proposent par ailleurs le terme de « thermopériodisme à l'optimum » (« optimal thermoperiodicity ») dans le cas où l'application d'une certaine amplitude nycthémérale est plus favorable que n'importe quelle température constante. Ces définitions, si elles ont l'avantage de préciser clairement le problème étudié, ont cependant le défaut de négliger le fait que les réponses de la plante à la température ne sont pas linéaires, et que les courbes d'action pour les différentes fonctions physiologiques peuvent diverger sensiblement. Ils appliquent néanmoins ces principes d'investigation à la recherche des meilleures conditions de croissance, dans la gamme de 15 à 30 °C, pour différentes espèces, et n'en trouvent aucune qui réponde au critère de « thermopériodisme à l'optimum » : la plus forte croissance est toujours obtenue en conditions constantes ; par contre, lorsque la température moyenne est différente de l'optimum, ils observent qu'une variation nycthémérale peut être bénéfique, que l'écart de température jour/nuit soit positif ou négatif. Dans le cas du Blé, des mesures d'échanges gazeux leur permettent d'attribuer ce fait (pour un écart positif) à une augmentation de l'assimilation nette par rapport au témoin. Hussey (1965) arrive à des conclusions similaires sur la Tomate : le bilan d'assimilation nette de jeunes plantules est maximum lorsque la température est maintenue constante à 25 °C, mais l'alternance jour-nuit a un effet positif lorsque la température moyenne s'écarte de cette valeur. De même, Calvert (1963) note que quelques heures passées à une température proche de l'optimum peuvent compenser une moyenne défavorable.

On peut dégager de ces travaux quelques traits caractéristiques :

— D'une façon générale, le facteur essentiel dans l'action à plus ou moins long terme de la température est sa valeur moyenne journalière. Cette action se caractérise par l'existence d'un optimum en général supérieur aux valeurs rencontrées dans les conditions de culture des plantes.

— S'il est vrai que, dans le cas où la température moyenne journalière s'écarte de l'optimum, une variation nycthémérale peut s'avérer favorable, il paraît difficile

de parler de plantes « thermopériodiques ». Le concept de thermopériodisme repose bien souvent sur l'idée que les basses températures nocturnes doivent être favorables à la plante puisqu'elles limitent les pertes respiratoires ; mais en fait l'influence du climat nocturne sur les échanges gazeux ne se limite pas à la période obscure mais concerne également la période diurne.

II. — Action de la température nocturne sur les échanges gazeux

Le problème de l'action des températures nocturnes est assez différent de celui du thermopériodisme. D'un point de vue pratique, dans le cas des cultures sous serres, il s'agit non pas de maintenir l'alternance optimale, mais de limiter la chute de température pendant la nuit dans des limites tolérables par la plante.

D'un point de vue théorique, ce problème s'écarte de la définition de Friend et Helson, puisque la température moyenne varie en même temps que la température nocturne ; il est plus proche des conceptions de Went, qui recherche séparément les optima diurne et nocturne ; cependant ici nous considérons essentiellement la modification des phénomènes diurnes sous l'effet des conditions nocturnes.

Le nombre de travaux concernant l'action spécifique de la température nocturne sur les échanges gazeux (Photosynthèse, Respiration, Transpiration) est assez restreint. De plus, les réponses observées varient avec le type métabolique des plantes étudiées (C_3, C_4, CAM) qui se traduit par une réaction différente aux conditions climatiques (Björkman, 1975 ; Moyse, 1976).

1. — *Plantes de type CAM*

Les plantes à métabolisme CAM (Métabolisme Acide Crassulacéen) se distinguent par leur capacité à assimiler le CO_2 pendant la nuit, et l'accumuler sous forme d'acides ; ceci, couplé avec un rythme d'activité stomatique « inversé » donne à leurs échanges gazeux des caractéristiques très différentes de celles des types C_3 ou C_4 (Queiroz, 1976 ; Moyse, 1976). En conditions normales, la température nocturne agira donc sur l'assimilation de façon directe, et non par un arrière-effet. Cependant, chez la plupart des plantes présentant ce type de métabolisme, l'absorption du CO_2 peut se faire soit de nuit (type CAM), soit de jour (type C_3) en fonction des conditions de milieu, et en particulier de la température nocturne (Neales, 1973 *a*).

Neales a étudié, pour des conditions diurnes de température et de lumière maintenues constantes, l'action de la température nocturne (15 à 35 °C) et de la durée du jour sur les échanges de CO_2 des parties aériennes d'Agave (Neales, 1973 *a*) et d'Ananas (Neales, 1973 *b*). Chez l'Ananas, la température nocturne influence essentiellement la répartition de l'absorption de CO_2 entre les périodes de jour et d'obscurité ; l'absorption nocturne peut varier de 0 à 100 p. 100 des échanges totaux et est maximum en conditions de nuits froides. Sur l'Agave, Neales a étudié conjointement les échanges de vapeur d'eau. Il observe que les nuits chaudes entraînent une augmentation des échanges diurnes et une diminution des échanges nocturnes, conduisant au niveau du bilan de la journée à une baisse de l'assimilation nette et un accroissement des pertes en eau. L'analyse détaillée des résultats l'amène à conclure que l'assimilation du CO_2 en période diurne et nocturne se fait par des mécanismes différentes, dont les optimum

thermiques sont éloignés. D'autres travaux (Queiroz, 1976) ont montré que les activités enzymatiques dans ces différents systèmes sont commandées par des « horloges physiologiques » sous la dépendance de la photo- et de la thermopériode.

L'action spécifique de la température nocturne sur les échanges diurnes est ainsi masquée par le changement de type métabolique, ce qui rend impossible son étude précise ; on peut simplement signaler que les nuits chaudes favorisent l'assimilation diurne.

2. — *Plantes de type C_3*

Rasmussen et Andersen (1976) ont étudié l'évolution au cours de la journée du taux d'assimilation nette de diverses plantes ornementales, après des nuits passées à des températures comprises entre 8 °C et 19 °C. Leurs résultats peuvent se résumer de la façon suivante : le taux maximum est atteint d'autant plus rapidement, et est d'autant plus élevé, que la nuit précédente a été chaude ; la baisse d'assimilation qui se produit en fin de journée est fonction du maximum atteint, mais au niveau du bilan diurne, la température nocturne optimale semble se situer entre 15 et 20 °C pour toutes les plantes étudiées.

Hussey (1965) étudie le bilan diurne et nocturne en poids frais et en matière sèche de jeunes plantules de Tomate, pendant et après une nuit à 15 ou 25 °C. Il observe que, si les pertes nocturnes (respiration) ne sont pas effectées de façon significative par la température, par contre une nuit chaude a un arrière-effet favorable sur le gain de matière sèche (assimilation nette) au cours du jour suivant. Il attribue ces résultats à une plus forte augmentation de surface foliaire, due à une stimulation des divisions cellulaires, pendant la nuit chaude, ce qui permet ensuite un taux d'assimilation par plante supérieur, même si l'assimilation par unité de surface n'est pas modifiée. Il ne commente pas ses résultats sur l'évolution du poids frais, qui montrent que l'absorption d'eau par la plante est considérablement réduite au cours des nuits fraîches.

Izhar et Wallace (1967) et Crookston *et al.* (1974) étudient de façon assez complète l'action de la température nocturne sur le Haricot. Izhar et Wallace observent que la photosynthèse, chez des plantes ayant subi une nuit à 10 °C, par rapport à des témoins maintenus à 18 °C, est réduite à peu près de moitié en début de journée, puis rattrape progressivement celle des témoins, en 6 h environ. Crookston *et al.* observent un effet dépressif des basses températures nocturnes (5 °C) sur les échanges diurnes de CO_2 et de vapeur d'eau ; parmi les paramètres caractéristiques de la photosynthèse, les activités des principales enzymes, ainsi que la résistance du mésophylle à la diffusion du CO_2 (r_m) sont peu modifiées ; par contre, la résistance stomatique (r_s) augmente considérablement, en liaison avec les variations du potentiel hydrique des feuilles qui passe de — 2 bars au lever du jour à — 7 bars au bout d'une heure chez les plantes ayant subi une nuit à 5 °C.

Par contre, lorsque seule la partie aérienne de la plante subit les basses températures, la racine étant maintenue à 18 °C, ils n'observent aucune modification des échanges gazeux ; il en est de même lorsque les plantes sont replacées pendant 24 h en conditions normales avant de procéder aux mesures. Les auteurs concluent de ces résultats que les basses températures agissent au niveau des racines en induisant, au moment du passage à la lumière, un stress hydrique qui entraîne la fermeture des stomates ; c'est l'augmentation de r_s qui expliquerait la diminution des échanges

gazeux. Cette hypothèse, effectivement compatible avec leurs résultats, aurait été consolidée s'ils avaient également réalisé l'expérience où seules les racines subissent les basses températures.

Hurd et Enoch (1976) étudient les échanges gazeux et la croissance d'Œillets après 1 à 5 semaines sous différentes températures nocturnes (6 à 30 °C). Ils n'observent aucun effet, ni sur le taux de photosynthèse maximum, ni sur la transpiration ; cependant leurs courbes d'assimilation semblent montrer que les plantes élevées en régime de nuits froides réalisent leur maximum d'échanges de CO_2 avec un retard de plusieurs heures. La mesure des échanges nocturnes montre que la respiration dépend à la fois de la température nocturne d'élevage et de la température au moment de la mesure, les valeurs les plus élevées étant obtenues chez les plantes élevées en nuits froides ; cependant les différences entre traitements, assez considérables en valeur relative, n'entraînent pas de différence au niveau du bilan de matière sèche. Enfin, ces auteurs citent un travail de Wilson (1970) sur *Lolium* selon lequel les basses températures nocturnes induiraient une diminution de la photosynthèse, par l'intermédiaire d'une action sur le grandissement cellulaire.

Chez les plantes de type C_3, on observe donc une limitation de l'assimilation sous l'effet des nuits fraîches ; cette action peut s'expliquer soit par un déficit hydrique — dans ce cas la température agit surtout au niveau des racines —, soit par une limitation de la mise en place de nouvelles structures.

3. — *Plantes de type C_4*

Les plantes à métabolisme en C_4, ainsi appelées d'après les produits primaires de la fixation photosynthétique du CO_2, sont caractérisées par une anatomie particulière, avec spécialisation des cellules du mésophylle et de celles de la gaine périvasculaire, une faible photorespiration, et des valeurs de r_m particulièrement basses (Jolivet, 1976 ; Moyse, 1976). Ceci entraîne à la fois un parallélisme plus étroit entre photosynthèse et transpiration, et une meilleure efficience de l'eau (rapport entre quantités de CO_2 fixé et d'eau transpirée). Ce sont donc souvent des plantes adaptées aux climats secs et chauds (Björkman et Berry, 1973).

West *et al.* (1969) observent qu'une seule nuit à 10 °C réduit fortement l'assimilation du Pangola ; Carter et Garrard (1976) étudient plus en détail l'action des températures nocturnes sur cette plante ; ils observent, sous l'action des nuits froides, une accumulation d'amidon dans les chloroplastes du mésophylle, en relation avec une baisse d'activité des enzymes amylolytiques, ainsi que de l'exportation d'assimilats hors des feuilles ; ceci s'accompagne d'une baisse d'environ 30 p. 100 de la photosynthèse nette, explicable au moins en partie par l'accumulation d'amidon, qui entraîne des déformations et des lésions des chloroplastes (Garrard et Carter, 1976). West (1973) fait les mêmes observations, et note également sur du Millet que les basses températures sont beaucoup plus néfastes de nuit que de jour, et entraînent une accumulation d'amidon et une baisse de l'assimilation. Même après plusieurs jours, celle-ci reste inférieure à la valeur mesurée chez les plantes non traitées.

Pour tester l'hypothèse d'une action par l'intermédiaire de la concentration en assimilats dans la feuille, Carter et Garrard (1976) étudient l'action de deux températures nocturnes (10 et 30 °C) sur l'assimilation, d'une part sur des plantes normales, d'autre part sur des plantes auxquelles ils ont fait épuiser leurs réserves en assimilats

par un passage de 12 h à l'obscurité à température élevée. Si les résultats obtenus avec les plantes à fort contenu en assimilats confirment les travaux de West (West, Biggs et Baskin, 1969 ; West, 1973) sur l'action des nuits fraîches, les plantes dépourvues de réserves, contrairement à leur attente, ont une assimilation plus faible après une nuit à 30 °C qu'à 10 °C. Il est probable que dans ce cas les réserves de la plante ont été suffisamment réduites pour qu'une partie des constituants de son appareil photosynthétique aient été utilisés comme substrat respiratoire, ce qui expliquerait l'assimilation réduite ; mais ces résultats ne donnent pas d'information quant au mécanisme d'action des basses températures nocturnes.

Pasternak et Wilson (1972) étudient l'action de différentes températures nocturnes, appliquées pendant une seule nuit, sur les échanges gazeux du Sorgho. Ils observent, de part et d'autre d'un optimum de l'ordre de 25 °C, une baisse de l'assimilation lorsque la température s'éloigne de cette valeur ; cet effet dépressif est d'autant plus marqué que la plante entière, et non la partie aérienne seule, est soumise à ces conditions. L'évolution de l'ouverture stomatique est étroitement parallèle à celle de l'assimilation ; ils observent également une baisse du contenu en eau des feuilles, et proposent, à partir de ces observations, le même mécanisme que celui évoqué par Crookston (1974) pour le Haricot : les températures nocturnes extrêmes entraîneraient un déficit hydrique au moment du passage à la lumière, d'où une fermeture des stomates plus ou moins prolongée, qui serait à l'origine de la baisse d'assimilation.

Chez les plantes C_4, l'action inhibitrice des nuits fraîches s'expliquerait donc plutôt par l'accumulation d'amidon dans les chloroplastes ; l'intervention d'un stress hydrique au niveau des feuilles ne peut cependant pas être écartée.

III. — Modes d'action de la température nocturne

1. — *Caractéristiques de cette action*

D'après les quelques travaux étudiés ici, on peut tirer les grands traits de l'action du climat nocturne sur la photosynthèse :

— Cette action existe chez toutes les plantes étudiées ; seul l'Œillet semble réagir de façon faible ou nulle.

— Dans les cas où on a comparé suffisamment de conditions différentes pour tracer une courbe d'action de la température nocturne, celle-ci suit le schéma général des lois d'action de la température : existence d'un optimum et effet dépressif lorsqu'on s'éloigne de cette valeur. L'optimum est en général supérieur aux valeurs rencontrées en conditions « naturelles », et la réponse des plantes aux nuits chaudes (au-delà de cet optimum) est peu étudiée.

— Le lieu d'action de la température varie d'une plante à l'autre : chez le Haricot, seules les racines seraient sensibles, alors que chez le Sorgho, les parties aériennes jouent un rôle plus important. Mais on peut à ce propos regretter que l'action des basses températures appliquées aux racines seules n'ait pas été étudiée (Pasternak et Wilson, 1972 ; Crookston *et al.*, 1974).

— En ce qui concerne les mécanismes mis en jeu, il est plus difficile d'arriver à une synthèse de ces travaux. On peut cependant dégager les hypothèses suivantes :

a) Certains auteurs (Pasternak et Wilson, 1972 ; Crookston *et al.*, 1974) avancent l'hypothèse d'un déficit hydrique au début du jour, déficit qui serait accentué par les nuits froides, soit au niveau des racines (Crookston *et al.*, 1974), soit sur toute la plante (Pasternak et Wilson, 1972), et qui entraînerait une fermeture prolongée des stomates.

b) Selon une deuxième hypothèse (West, 1973 ; Carter et Garrard, 1976), les basses températures nocturnes entraînent une réduction de l'exportation hors de la feuille des produits de la photosynthèse ; l'augmentation de la concentration en assimilats inhibe alors la photosynthèse.

c) Enfin, une troisième hypothèse (Hussey, 1965 ; Hurd et Enoch, 1976) suppose que les basses températures limitent l'utilisation des assimilats dans la feuille pour la mise en place de nouvelles structures, et pour l'augmentation de la surface foliaire. Dans ce cas, c'est le potentiel assimilateur de la plante qui se trouverait modifié.

En relation avec les deux dernières hypothèses, certains auteurs notent une augmentation de la respiration après les nuits froides ; mais ce phénomène ne paraît pas avoir un poids significatif dans le bilan des échanges globaux.

Nous allons maintenant étudier plus en détail ces hypothèses, en liaison avec les connaissances actuelles sur la physiologie des différentes fonctions de la plante.

2. — *Validité des modèles explicatifs*

La première hypothèse (déficit hydrique) repose sur les nombreux travaux concernant l'action de la température sur l'absorption d'eau au niveau des racines (Boxall, 1963 ; Abdelhafeez *et al.*, 1971 ; Kleinendorst et Brouwer, 1972 ; Cooper, 1973 ; Cornillon, 1974). En général, un sol froid entraîne un ralentissement de l'absorption, souvent expliqué par une augmentation de la viscosité de l'eau ou du protoplasme cellulaire (Böhning et Lusanandana, 1952 ; Boxall, 1963 ; Cornillon, 1974) ; un abaissement brusque de la température a un effet plus marqué qu'une variation graduelle, étalée sur plusieurs jours (Böhning, Kendall et Linck, 1953). Cependant, ce ralentissement est provisoire, de même que les variations de potentiel hydrique et d'ouverture stomatique qui en découlent : les plantes semblent capables de s'adapter à une assez large gamme de températures de sol (Abdelhafeez *et al.*, 1971 ; Kleinendrost et Brouwer, 1972 ; Cooper, 1973). Au niveau de la partie aérienne, le mécanisme par lequel une basse température induirait un stress hydrique n'est pas évoqué (Pasternak et Wilson, 1972).

Hsiao (1973) note que la fermeture des stomates qui suit un déficit hydrique peut durer de 1 à 5 j après le retour à un potentiel normal ; cet arrière-effet est approximativement proportionnel au déficit subi. Drake et Salisbury (1972) étudient l'action d'un prétraitement de 72 h à haute ou basse température sur la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau des feuilles de *Xanthium* ; les plantes traitées à haute température montrent peu de différence avec les témoins ; celles traitées à basse température ont une résistance à la diffusion élevée, donc une transpiration faible et une température foliaire plus forte ; mais cette fermeture des stomates peut aussi bien être la conséquence de la baisse d'assimilation (par augmentation du CO_2 intercellulaire) que sa cause. Bunce (1977) observe au cours de l'établissement d'un déficit hydrique, une augmentation à la fois de r_s et de r_m ; le mécanisme d'action d'une baisse du potentiel ne peut donc pas se limiter à la fermeture des stomates. D'autres auteurs confirment

ces résultats : Boyer (1971) étudiant la reprise d'activité des feuilles de Tournesol après un stress hydrique, note qu'il faut plusieurs jours pour que les stomates retrouvent leur ouverture normale, ceci étant dû à une augmentation des résistances au transfert de l'eau dans les racines et les tiges ; l'activité photochimique, elle, retrouve son niveau normal après 15 h environ. Hofstra et Hesketh (1969) confirment l'effet négatif d'une seule nuit à basse température sur l'ouverture stomatique des feuilles de Maïs et Soja au cours de la journée suivante.

En résumé, les nuits fraîches peuvent provoquer en début de journée un déséquilibre entre la demande d'eau au niveau de la feuille, dont les stomates s'ouvrent, et la fourniture d'eau par les racines, qui sont encore à une température relativement basse. Ce déséquilibre peut entraîner une baisse du potentiel hydrique de la feuille, avec des répercussions à la fois sur r_m (avec une durée de plusieurs heures) et sur r_s (avec une durée qui peut aller jusqu'à plusieurs jours).

D'un autre côté, la température du sol a une action sur d'autres phénomènes que l'absorption de l'eau : d'une façon générale, les basses températures ralentissent l'activité racinaire, ce qui influe sur l'ensemble de la plante par l'intermédiaire de divers facteurs de corrélation (substances de croissance, assimilats retransformés) (Boxall, 1963 ; Guinn, Hunter, 1968 ; Cooper, 1973). On ne peut non plus négliger le rôle des racines dans le métabolisme de l'azote, particulièrement chez les légumineuses. Cooper (1973) observe également un effet dépressif d'une température du sol de 15 °C sur la croissance de la Tomate, lié au contenu en phosphore de la plante ; et Cornillon (1974) note que si l'absorption est peu affectée, la migration des éléments minéraux vers les parties aériennes est ralentie par le refroidissement du substrat.

Les deux autres hypothèses (influence du niveau d'assimilats foliaires ou ralentissement de la mise en place de nouvelles structures) supposent une action de la température sur les transferts des produits de la photosynthèse, qui, chez de nombreuses plantes, se produisent essentiellement la nuit (Went, 1944 ; Hussey, 1965 ; Madsen, 1968) ; Bendix et Went (1956), Hull (1962) et Went et Hull (1949) déduisent de leurs travaux sur la Tomate que les transferts sont favorisés par les basses températures ; mais ces résultats sont controversés et pourraient être faussés par la méthode employée (Hewitt et Curtis, 1948). Böhning *et al.* (1953) trouvent chez la Tomate un optimum voisin de 25 °C pour les transferts d'assimilats, que cette température soit appliquée au niveau du pétiole ou de la tige. Geiger (1966) sur la Betterave, observe une baisse des transferts lors d'un refroidissement du puits (organe récepteur des assimilats) ; ils retrouvent rapidement leur niveau normal lorsque celui-ci est ramené à sa température initiale ; Moorby *et al.* (1974) arrivent à une conclusion similaire en fonction de la température appliquée aux fruits d'un plant de Tomate. Hewitt et Curtis (1948) étudient l'effet de températures nocturnes de 4 à 40 °C sur des feuilles de Haricot et de Tomate ; dans la gamme étudiée, les exportations d'assimilats présentent un maximum pour une plage située entre 20 et 30 °C.

L'action inhibitrice des basses températures sur les exportations foliaires est donc bien établie ; par contre, l'interaction avec le niveau de photosynthèse, par l'intermédiaire de la concentration en assimilats, est une hypothèse qui a fait l'objet de nombreuses recherches (Neales et Incoll, 1968), mais pour laquelle peu de preuves concluantes ont été fournies. La plupart des études sur ce sujet établissent en effet des corrélations dont il est impossible de déduire des relations causales (Ermilov, 1963 ; Liu, Wallace et Ozbun, 1973) ou modifient simultanément trop de facteurs pour qu'on

puisse déterminer lequel est à l'origine des changements observés (Humphries, 1963 ; Thorne et Evans, 1964 ; Humphries, 1967), Le seul cas où une influence du contenu foliaire en assimilats sur la photosynthèse paraît certaine est celui où la concentration en amidon augmente de façon notable. On assisterait alors à deux phénomènes :

— une augmentation des longueurs de diffusion intracellulaire pour le CO_2 (Nafziger et Koller, 1976),

— une altération de la structure des chloroplastes, par l'action mécanique des grains d'amidon (Carter et Garrard, 1976 ; Garrard et Carter, 1976), dans ce cas, l'assimilation ne retrouve pas son niveau antérieur, même plusieurs jours après le retour à la normale du contenu en amidon (West, 1973). Les plantes de type C_4 seraient plus sensibles à ce phénomène que les plantes de type C_3 (Nafziger et Koller, 1976) ; la concentration en sucres solubles ne semble pas avoir d'effet (Thorne et Koller, 1974 ; Nafziger et Koller, 1976).

Ainsi les basses températures nocturnes entraînent un stockage des assimilats à l'état brut au niveau de la feuille, qui dans quelques cas peut expliquer la baisse d'assimilation.

D'un autre côté, ce stockage peut se traduire par un manque de produits élaborés utiles à la photosynthèse, qui entraînerait une réduction du potentiel assimilateur de la plante. Cette hypothèse est à mettre en relation avec les études sur la respiration (Penning De Vries, 1972 ; Mc Cree, 1974). Par exemple, Mc Cree (1974) décompose la respiration nocturne en deux composantes : respiration de maintenance (Rm) et de croissance (Rc) ; Rm traduit la dépense d'énergie nécessaire au maintien et au remplacement des structures existantes, et dépend à la fois de la biomasse et de la température ; Rc traduit la mise en place de nouvelles structures à partir des assimilats assumulés au cours de la journée. Sa valeur potentielle ne dépend que de l'assimilation nette du jour précédent, mais la réalisation plus ou moins rapide de ce potentiel dépend de la température. Dans le cas de nuits froides, le remaniement des assimilats ne pourrait être achevé au cours de la nuit, ce qui se traduirait par une valeur de Rc inférieure à sa valeur potentielle. Deux cas sont alors possibles : la baisse d'assimilation peut traduire soit une modification de la photosynthèse brute, puisque le potentiel assimilateur est réduit, soit une augmentation de la respiration, traduisant la poursuite du remaniement des assimilats ; dans ce dernier cas, la photosynthèse brute ne serait pas affectée.

Conclusion

L'action inhibitrice des nuits froides sur l'assimilation, phénomène quasi général, peut avoir une importance non négligeable dans la période de mise en place de la culture, étant donnée les températures habituellement rencontrées à cette période sous nos climats.

Nous avons vu que les différents mécanismes proposés pour cette action sont cohérents, même s'ils manquent de preuve expérimentale directe. Il est utile de rappeler ici leurs caractéristiques distinctives, de façon à en tirer toutes les conséquences pratiques, en particulier pour cette vérification expérimentale :

1. — *Déficit hydrique*

— L'action des basses températures se situe essentiellement au niveau des racines.

— C'est au moment du passage de l'obscurité à la lumière que cette action se fait sentir.

— Elle se traduit par une baisse du potentiel hydrique de la feuille.

2. — *Niveau d'assimilats foliaires*

— L'action porte sur deux types d'organe : les feuilles d'une part, les puits d'autre part (fruits, bourgeons, racines...) ; dans la plupart des cas cela représente la quasi-totalité de la plante, sauf aux stades de maturation des grains ou des fruits, où les puits sont mieux localisés.

— L'influence de la température s'exerce tout au long de la nuit ; cependant si la température n'est pas suffisamment basse pour arrêter totalement les transferts, on peut s'attendre à ce qu'un allongement de la période d'obscurité atténue l'effet inhibiteur.

— Cette inhibition se traduit par une augmentation du contenu en glucides et en amidon en fin de nuit ; elle est d'autant plus marquée que l'assimilation antérieure a été importante.

3. — *Mise en place des structures*

— L'action est localisée au niveau des feuilles.

— La température agit pendant toute la nuit ; un allongement de la période nocturne réduit l'inhibition, mais celle-ci est d'autant plus marquée que l'assimilation antérieure a été faible.

— Les paramètres susceptibles d'être modifiés sont la surface folaire, et l'importance relative de la respiration dans le bilan d'assimilation.

Ces différents points sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Mécanisme	Déficit hydrique	Niveau d'assimilats	Mise en place des structures
Lieu d'action de la température.....	Surtout les racines	— Feuilles — Puits d'assimilats	— Feuilles — Sources de substances élaborées pour les feuilles
Moment de l'action...	Passage à la lumière	Toute la nuit	Toute la nuit
Autre facteur intervenant		— Durée de la nuit — Niveau d'assimilation de la veille	— Durée de la nuit — Niveau d'assimilation de la veille
Paramètres modifiés.	— Potentiel hydrique	— Concentration en assimilats et en amidon — Respiration obscure	— Surface foliaire — Respiration obscure

Ces différentes possibilités, qui ne s'excluent d'ailleurs nullement, font toutes intervenir des relations entre organes ou fonction du végétal.

Ceci impose quelques précautions dans les programmes de recherche concernant ce phénomène :

Par exemple si l'on veut aborder ce problème dans un programme de sélection pour l'adaptation au climat, il sera nécessaire de tenir compte des différentes fonctions de la plante : assimilation, transformation des assimilats, activité racinaire, etc..., et d'utiliser pour celà des variétés « rustiques », aux potentialités multiples.

En ce qui nous concerne, nous tenterons dans un prochain article de quantifier l'action de la température nocturne sur la photosynthèse en analysant les échanges gazeux des plantes entières : dans une telle étude, il est nécessaire de prendre en compte la réponse de l'ensemble de la plante, et son évolution au cours de la croissance. Pour cela, de même que pour les applications pratiques qui peuvent en découler, l'expérimentation en serre peut être un outil précieux. Elle permet en effet un contrôle partiel de certains facteurs comme le rayonnement, la température, l'ETP, qui en conditions naturelles sont étroitement liés. Elle occupe ainsi une situation intermédiaire qui permet de passer de l'environnement totalement artificiel des chambres d'assimilation et des phytotrons, outils d'analyse, à l'application aux conditions normales de culture.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Summary

Night temperature and photosynthesis - A review

Climate exerts long- and short-term after-effects on gas exchanges of plants, the study of which can provide useful informations about their physiology.

The influence of night temperature is of great importance, as well for growth modelling as for greenhouse cultures. Its action is referred to the different after-effects of temperature : influence of growth conditions and of thermoperiod.

Litterature on the subject deals mainly with the inhibition of net assimilation by cool nights. Two possible mechanisms are proposed : cool nights can induce a water deficit at dawn (C_3 plants) or raw assimilate accumulation in the leaf (some C_4 plants). These mechanisms agree with temperature effects on water movements through the plant, on the one hand, and on assimilates transfer and transformation, on the other hand.

Zusammenfassung

Nachttemperatur und Photosynthese
I. — Bibliographische Untersuchung

Die Nachwirkungen des Klimas auf den Gasaustaūsch der Pflanzen können in verschiedenem Masst wertvolle Informationen über ihre Wirkungsweise erbringen. Die Nachttemperatur wur de wegen der Wischtigkeit dieses Problems vom Standpunkt der Moddelisierung aus sowie für die Ausführung von Gewächshauskulturen gewählt. Ihre Wirkung wird im Rahmen der verschiedenen Nachwirkungen der Temperatur wie Einfluss der Wachstumbedingungen und Thermoperiodismus ixtrachtet. In der literatur findet man hauptsachlich Informationen über die Hemmung des Stoffwechsels durch die kalten Nächte. Zwei Arten von Mechanismen werden allgemein vorgeschlagen : Wasserdefizit am Tages an bruch (eher für die C_3 Pflanzen) oder Anhäufung der Rohassimilate in den Blättern (eher C_4 Pflanzen) ; diese Mechanismen entsprechen der Temperatur-wirkung auf die Wasserbewefungen innerhalb der Pflanze einerseits und auf den Transport und die Verarbeitung der Assimilate anderseits.

РЕЗЮМЕ

Ночная температура и фотосинтез.

I. — Библиографическое изучение

ЛОНГЕНЕСС Ж. Ж.

Различия в силе последействий климата на газообмен растений могут доставить ценную информацию о его функционировании. Ночные температуры были выбраны ввиду важности этой проблемы, как для моделирования, так и для практики культур в оранжереях. Действие этих температур помещалось в рамки различных ее последействий : влияния условий роста, термопериодизм. В библиографии фигурируют главным образом сведения о подавлении усвоения в течении холодных ночей. В большинстве случаев предлагаются два механизма : водный дефицит на заре (скорее для растений C_3), или валовое накопление усвоенных веществ в листьях (особенно для растений C_4) механизмы эти отвечают действию температуры, с одной стороны, на движение влаги в растении, а с другой-на перенос и превращения усвоенных веществ.

Références bibliographiques

ABDELHAFEEZ A. T., HARSSEMA H., VERI G., VERKERK K., 1971. Effects of soil and air temperature on growth, development and water use of tomato. *Neth. J. Agric. Sci.*, **19,** 67-75.

BENDIX S., WENT F. W., 1956. Some effects of temperature and photoperiod on the growth of tomato seedlings. *Bot. Gaz.*, **117,** 326-335.

BJÖRKMAN O., 1975. Inaugural adress. pp. 1-16 in *Environmental and biological control of photosynthesis*. R. Marcelle Ed., Junk, La Haye.

BJÖRKMAN O., BERRY J., 1973. High efficiency photosynthesis. *Sci. Amer.*, **229,** 80-93.

BÖHNING R. H., KENDALL W. A., LINCK A. J., 1953. Effect of temperature and sucrose on growth and translocation in tomato. *Amer. J. Bot.*, **40,** 150-153.

BÖHNING R. H., LUSANANDANA B., 1952. A comparative study of gradual and abrupt changes in root temperature on water absorption. *Plant Physiol.*, **27,** 475-488.

BOXALL M., 1963. Some effects of soil temperature on the growth of tomato. *XVIth Inter. Hort. Congress 1962*, vol. 2, 259-265.

BOYER J. S., 1971. Recovery of photosynthesis in sunflower after a period of low leaf water potential. *Plant Physiol.*, **47,** 816-820.

BUNCE J. A., 1977. Nonstomatal inhibition of photosynthesis at low water potentials in intact leaves of species from a variety of habitats. *Plant Physiol.*, **59,** 348-350.

CALVERT A., 1963. Temperature control for tomato propagation. *XVIth Inter. Hort. Congress 1962 Proc.*, vol. 2, 462-465.

CARTER J. L., GARRARD L. A., 1976. Effects of 10 °C night temperature and leaf assimilate level on photosynthesis of *Digitaria decumbens* Stent. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **35,** 3-5.

COOPER A. J., 1973. *Root temperature and plant growth. A review*. Research review n° 4 of the Commonwealth. Bureau of Hort. and plantation crop. Commonwealth Agricultural Bureau.

COOPER A. J., 1973. Influence of rooting medium temperature on growth of *Lycopersicum esculentum*. *Ann. appl. Biol.*, **74,** 379-385.

CORNILLON P., 1974. Comportement de la tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.*, **25,** 753-377.

CROOKSTON R. K., O'TOOLE J., LEE R., OZBUN J. L., WALLACE D. H., 1974. Photosynthetic depression in beans after exposure to cold for one night. *Crop Sci.*, **14,** 457-464.

DRAKE B. G., SALISBURY F. B., 1972. After effects of low and high temperature pretreatment on leaf resistance, transpiration, and leaf temperature in Xanthium. *Plant Physiol.*, **50,** 572-575.

ERMILOV G. B., 1963. Leaf productivity and internal plant processes. *Soviet Plant Physiol.*, **9,** 315-317.

FRIEND D. J. C., HELSON V. A., 1976. Thermoperiodic effects on the growth and photosynthesis of wheat and other crop plants. *Bot. Gaz.*, **137,** 75-84.

GARRARD L. A., CARTER J. L., 1976. Leaf assimilate level and photosynthesis of *Digitaria decumbens* Stent. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **35,** 6-10.

GEIGER D. R., 1966. Effect of sink region cooling on translocation of photosynthates. *Plant Physiol.*, **41,** 1667-1672.

GUINN G., HUNTER R. E., 1968. Root temperature and carbohydrate status of young cotton plants. *Crop Sci.*, **8,** 67-70.

HESKETH J. D., 1968. Effects of light and temperature during plant growth on subsequent leaf CO_2 assimilation rates under standard conditions. *Austr. J. Biol. Sci.*, **21,** 235-241.

HEWITT S. P., CURTIS O. F., 1948. The effect of temperature on loss of dry matter and carbohydrates from leaves by respiration and translocation. *Amer. J. Bot.*, **35,** 746-755.

HOFSTRA G., HESKETH J. D., 1969. The effect of temperature on stomatal aperture in different species. *Can. J. Bot.*, **47,** 1307-1310.

HSIAO T. C., 1973. Plant response to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **24,** 519-570.

HULL H. M., 1952. Carbohydrate translocation in tomato and sugar beet with particular reference to temperature effect. *Amer. J. Bot.*, **39,** 661-669.

HUMPHRIES E. C., 1963. Dependance of net assimilation rate on root growth of isolated leaves. *Ann. Bot.*, **27,** 175-183.

HUMPHRIES E. C., 1967. The effect of root formation on photosynthesis of detached leaves. *Ann. Bot.*, **31,** 391-400.

HURD R. G., ENOCH H. Z., 1976. Effect of night temperature on photosynthesis, transpiration, and growth of spray carnation. *J. Exp. Bot.*, **27,** 695-703.

HUSSEY G., 1965. Growth and development in the young tomato. III. The effect of night and day temperatures on vegetative growth. *J. Exp. Bot.*, **16,** 373-385.

IZHAR S., WALLACE D. H., 1967. Effect of night temperature on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris*. *Crop Sci.*, **7,** 546-547.

JOLIVET E., 1976. Les différentes modalités de carboxylation photosynthétique chez les espèces de type C_3 et de type C_4. *Physiol. Vég.*, **14,** 563-594.

KISHITANI S., TSUNODA S., 1974. Effect of low and high temperature pretreatment on leaf photosynthesis and transpiration in cultivars of *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, **8,** 161-167.

KLEINENDORST A., BROUWER R., 1972. The effect of local cooling on growth and water content of plants. *Neth. J. Agric. Sci.*, **20,** 203-217.

LIU P., WALLACE D. H., OZBUN J. L., 1973. Influence of translocation on photosynthetic efficiency of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiol.*, **52,** 412-415.

MADSEN E., 1968. Effect of CO_2-concentration on the accumulation of starch and sugar in tomato leaves. *Physiol. Plant.*, **21,** 168-175.

Mc CREE K. J., 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as a function of dry weight, photosynthetic rate, and temperature. *Crop Sci.*, **14,** 509-514.

MOONEY H. A., HARISSON A. T., 1970. The influence of conditioning temperature on subsequent temperature-related photosynthetic capacity in higher plants. pp. 411-417 in *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*, IBP-PP technical meeting, C.T. de Wit Ed., Pudoc, Wageningen.

MORBY J., TROUGHTON J. H., CURRIE B. G., 1974. Investigations of carbon transport in plants. 2. The effects of light and darkness and sink activity on translocation. *J. exp. Bot.*, **25,** 937-944.

MOYSE A., 1976. Les types métaboliques des plantes : C_4 et CAM. Comparaison avec les plantes C_3. *Physiol. Vég.*, **14,** 533-550.

NAFZIGER E. D., KOLLER H. R., 1976. Influence of leaf starch concentration on CO_2 assimilation in soybean. *Plant Physiol.*, **57,** 560-563.

NEALES T. F., 1973 *a*. The effect of night temperature on CO_2 assimilation, transpiration, and water use efficiency in *Agave americana* L. *Austr. J. Biol. Sci.*, **26,** 705-714.

NEALES T. F., 1973 *b*. Effect of night temperature on the assimilation of carbon dioxide by mature pineapple plants, *Ananas comosus* (L.) Mer. *Austr. J. Biol. Sci.*, **26,** 539-546.

NEALES T. F., INCOLL L. D., 1968. The control of leaf photosynthesis rate by the level of assimilate concentration in the leaf : a review of the hypothesis. *Bot. Rev.*, **34,** 107-125.

PASTERNAK D., WILSON G. L., 1972. After effect of night temperature on stomatal behaviour and photosynthesis of Sorghum. *New Phytol.*, **71,** 683-689.

PEET M. M., OZBUM J. L., WALLACE D. H., 1977. Physiological and anatomical effects of growth temperatures on *Phaseolus vulgaris* L. cultivars. *J. exp. Bot.*, **28,** 57-69.

PENNING DE VRIES F. W. T., 1972. Respiration and growth. pp. 327-347 in *Crop processes in controlled environments*, Rees *et al.* Ed., Academic Press, Londres.

QUEIROZ O., 1976. Chronobiologie du système CAM : les rythmes des capacités enzymatiques sont-ils des mécanismes régulateurs ? *Physiol. vég.*, **14,** 629-639.

RASMUSSEN B. P., ANDERSEN A., 1976. Nattemperaturens indflydelse pa fotosyntesehastigheden (the influence of night temperature on the rate of photosynthesis). *Ugeskrift for agronomer og hortonomer*, **121,** 10-13.

THORNE G. N., EVANS A. F., 1964. Influence of tops and roots on net assimilation rate of Spinach Beet and Sugar Beet and grafts between them. *Ann. Bot.*, **28,** 499-508.

THORNE J. H., KOLLER H. R., 1974. Influence of assimilate demand on photosynthesis, diffusive resistances, translocation, and carbohydrate levels of Soybean leaves. *Plant Physiol.*, **54,** 201-207.

TREHARNE K. J., NELSON C. J., 1975. Effect of growth temperature on photosynthetic and photorespiratory activity in tall Fescue pp. 61-70 in *Environmental and Biological control of photosynthesis*. R. Marcelle Ed., Junk, La Haye.

WENT F. W., 1944. Plant growth under controlled conditions. II. Thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomato. *Amer. J. Bot.*, **31**, 135-150.

WENT F. W., HULL H. H., 1949. The effect of temperature upon translocation of carbohydrates in the tomato plant. *Plant Physiol.*, **24**, 505-526.

WEST S. H., 1973. Carbohydrate metabolism and photosynthesis of tropical grasses subjected to low temperatures. pp. 165-168, *Plant response to climatic factors*, UNESCO Uppsala symposium (Ecology and conservation, 5).

WEST S. H., BIGGS R. H., BASKIN J. H., 1969. Growth and photosynthesis of Pangolagrass (*Digitaria decumbens* Stent.) in a gradient of temperatures. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **28**, 29-35.

Ann. agron., 1978, **29** (6), 541-557.

Prévision des équilibres d'échange entre quatre cations dans un substrat de tourbe de sphaignes

J. P. ANDRÉ

avec la collaboration technique de Lucette PIJAROWSKI
Station d'Agronomie et Physiologie Végétale, I.N.R.A.,
45, *Boulevard du Cap* 06602 *Antibes, B.P.* 78

Résumé

On étudie, à l'aide d'une méthode de prévision des équilibres d'échange, les distributions des cations K, NH_4, Ca, Mg, dans les phases solide et liquide d'un substrat de culture, constitué de tourbe et d'une solution fertilisante. L'effet-tampon de la tourbe est mis en évidence, lorsque la composition de la solution est perturbée par des additions ou des prélèvements d'eau ou d'ions simulant la fertilisation, l'irrigation, l'effet du climat et l'absorption racinaire.

Introduction

Les substrats organiques utilisés en cultures florales et maraîchères sont constitués d'une phase solide de capacité d'échange cationique souvent élevée, retenant par capillarité un volume important d'une solution aqueuse d'éléments fertilisants minéraux.

Ainsi, les substrats de tourbe de sphaignes, pure ou mélangée à des matières poreuses inertes (fragments de perlite ou de polystyrène expansé) en sont un cas particulier. Dans les conditions d'utilisation de tels substrats, la tourbe convenablement neutralisée, retient environ un équivalent de cations échangeables par kg de matière sèche et trois à cinq fois son poids de solution. Dans ces conditions, la quantité totale des cations adsorbés est plusieurs fois supérieure à celle des cations dissous, cinq à vingt fois selon la concentration de la solution : entre les deux phases, s'établissent des équilibres d'échange cationique que les prélèvements racinaires, les apports d'engrais, l'évaporation et l'irrigation déplacent en permanence.

Nous nous proposons de montrer qu'un transfert de matière donné entre la solution et le milieu extérieur entraîne un déplacement *prévisible* de l'équilibre, donc qu'on peut *prévoir quantitativement la nouvelle distribution cationique qui s'établira dans le substrat*. Nous pourrons mettre ainsi en évidence l'effet-tampon de la tourbe vis-à-vis de la composition cationique de la solution fertilisante.

L'étude préalable des propriétés d'échangeur cationique faible de la tourbe (André, 1976, 1977) et de la prévision des équilibres d'échange (André, 1970, 1975)

nous permettent d'aborder ce problème dans le cas relativement complexe où les cations Ca, Mg, K, NH_4 sont présents dans le substrat.

La méthode de prévision est exposée dans la première partie du mémoire ; elle est soumise, dans la seconde partie, à des vérifications expérimentales et conduit à des conclusions pratiques, notamment en ce qui concerne la préparation du substrat et le rôle de réserve des cations adsorbés.

Première partie

Etablissement de la méthode de prévision

Le substrat de tourbe est traité comme un système formé d'un échangeur cationique faible et d'une solution et sera défini par un nombre maximum de douze paramètres qui sont : la masse $\mathcal{M}$ de tourbe (en matière sèche), le volume $\mathcal{V}$ de la solution et les concentrations de chacun des cations dans les deux phases, soit au total dix paramètres de concentration si l'on ajoute le proton H qui intervient dans les échanges avec les cations Ca, Mg, K, NH_4. Ces paramètres ne sont pas tous indépendants.

Les effets des anions de la solution (formation de complexes minéraux solubles) seront négligés : le pouvoir tampon des phosphates vis-à-vis du pH est normalement plusieurs dizaines de fois inférieur à celui que la tourbe impose à la solution.

L'équilibre d'échange qui s'établit dans le substrat isolé est généralement rompu par un transfert de matière entre la solution et l'extérieur. Si l'on peut considérer que ce transfert est fini, limité dans le temps, qu'il ne crée pas de gradient de concentration en solution et laisse homogène le mélange des deux phases, on peut alors prévoir, à ces conditions, le nouvel équilibre qui se rétablira dans le substrat après le transfert de matière.

Le principe de la méthode de prévision est le suivant : nous définissons un *état fictif* du substrat dans l'instant qui suit le transfert de matière : cet état fictif, point de départ du déplacement d'équilibre, est défini par les valeurs des paramètres de la phase solide *avant* le transfert associées à celles de la phase liquide *après* le transfert. Le système étant à nouveau isolé, il suffit de poser que le nouvel équilibre est solution d'un système d'équations comprenant les équations d'équilibre préalablement établies pour ce substrat et les équations de conservation des cations présents dans le substrat après le transfert.

En tenant pour satisfaites des conditions de transfert de matière qui ne sont, en réalité, jamais parfaitement remplies, nous établirons des prévisions d'équilibre limite, optimal dans certains cas : ces résultats illustreront néanmoins l'interaction constante entre la tourbe et la solution.

Les paramètres et les équations du système sont définis dans les chapitres suivants :

1. — *Les paramètres du système*

La masse $\mathcal{M}$ et le volume $\mathcal{V}$ sont exprimés en kg de matière sèche et en l.

Soit C la concentration totale des cations métalliques en solution en éq/l :

$$C = [Ca] + [Mg] + [K] + [NH_4] .$$

Soit $\overline{C}$ la concentration totale des cations métalliques adsorbés en éq/kg de matière sèche :

$$\overline{C} = [\overline{Ca}] + [\overline{Mg}] + [\overline{K}] + [\overline{NH_4}] .$$

Dans les conditions de saturation optimale de la tourbe du substrat, $\overline{C}$ ne dépasse pas le total $\overline{C}_T$ des sites de la première acidité de la tourbe, comme nous avons pu le constater (André, 1976) ; il est donc inutile de tenir compte pour l'instant des fonctions ionisables aux pH alcalins. En notant que $\overline{C}_T$ est une caractéristique intrinsèque de l'échangeur, nous poserons donc :

$$\overline{C} + [\overline{H}] = \overline{C}_T . \qquad (1)$$

Nous définissons les trois couples de fractions ioniques x, x, $\bar{y}$, y et $\bar{z}$, z par les relations suivantes :

$$\bar{x} = \frac{[\overline{K}] + [\overline{NH_4}]}{\overline{C}} \qquad x = \frac{[K] + [NH_4]}{C}$$

$$\bar{y} = \frac{[\overline{K}]}{[\overline{K}] + [\overline{NH_4}]} \qquad y = \frac{[K]}{[K] + [NH_4]}$$

$$\bar{z} = \frac{[\overline{Ca}]}{[\overline{Ca}] + [\overline{Mg}]} \qquad z = \frac{[Ca]}{[Ca] + [Mg]} .$$

Les concentrations des cations peuvent donc s'écrire :

$$[\overline{Ca}] = \overline{C}(1 - \bar{x})\bar{z} \qquad [Ca] = C(1 - x)\, z$$
$$[\overline{Mg}] = \overline{C}(1 - \bar{x})\,(1 - \bar{z}) \qquad [Mg] = C(1 - x)\,(1 - z)$$
$$[\overline{K}] = \overline{C}\bar{x}\,\bar{y} \qquad [K] = Cxy$$
$$[\overline{NH_4}] = \overline{C}\bar{x}(1 - \bar{y}) \qquad [NH_4] = Cx(1 - y) .$$

La concentration [H] des protons sera identifiée avec leur activité (H) déduite de la mesure du pH.

Nous utiliserons par la suite les onze paramètres suivants :

$$\mathcal{M}, \overline{C}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \mathcal{V}, C, x, y, z, pH$$

en notant que la relation (1) permet de calculer le douzième $[\overline{H}]$: en pratique, quatre paramètres de concentration permettront de définir l'échangeur.

2. — *Les équations d'équilibre*

Les neuf paramètres de concentration $\overline{C}$, $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, C, x, y, z, pH suffisent pour définir un équilibre puisqu'on peut retirer une partie d'une phase, donc modifier $\mathcal{M}$ ou $\mathcal{V}$, sans le déplacer.

Si les paramètres de la solution sont imposés, ceux de l'échangeur le sont du même coup à l'équilibre et vice-versa : outre l'équation (1) il existe quatre autres équations d'équilibre liant ces paramètres. Les équations qui sont utilisées ici reposent sur l'étude préalable, avec la même tourbe, d'équilibres à un ou deux cations métalliques et sur des hypothèses simples relatives à l'interaction des cations Ca, Mg, K, NH_4

lorsqu'ils sont tous présents (voir Annexe). Ces quatre équations empiriques décrivent respectivement :

— l'équilibre global entre le proton et les cations métalliques (équation 2),

— l'équilibre entre l'ensemble des monovalents et l'ensemble des divalents (équation 3),

— l'équilibre entre les deux monovalents (équation 4),

— l'équilibre entre les deux divalents (équation 5).

Equation 2.

$$\left[\frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^2}\right]^{2,55} = 10^{-6,1} \cdot \frac{\gamma\, C(1 - x)}{(H)^2} \qquad (2)$$

ou

$$pH = 3,05 + 1,27 \log \frac{\overline{C}}{(\overline{C}_T - \overline{C})^2} - 0,50 \log \gamma\, C(1 - x) .$$

On remarque que le pH de la solution dépend du niveau de neutralisation $\overline{C}$ de la tourbe et de l'activité $\gamma\, C(1 - x)$ de la somme des cations divalents ; le rôle des monovalents dans cet équilibre global est en effet négligeable tant que leur fraction ionique totale x ne dépasse pas 0,9. Au-delà, l'équation n'est plus valide.

Equation 3.

$$\frac{\overline{x}^2}{1 - \overline{x}} = 0,5 \cdot \frac{C\, x^2}{\overline{C}(1 - x)} \qquad \text{(voir Annexe)} . \qquad (3)$$

Equation 4.

$$\overline{y} = y \qquad \text{(voir Annexe)} . \qquad (4)$$

Equation 5.

$$\frac{\overline{z}}{1 - \overline{z}} = 2 \cdot \frac{z}{1 - z} \qquad \text{(voir Annexe)} . \qquad (5)$$

3. — *Les équations de conservation des cations*

Nous posons que l'équilibre précédant le transfert de matière est défini, que le transfert porte sur des quantités connues de solvant et de soluté et que, par suite, l'état fictif défini plus haut est bien déterminé.

L'indice 1 est affecté aux valeurs connues des paramètres pour cet état fictif, et l'indice E aux valeurs des paramètres pour l'état d'équilibre que nous nous proposons de prévoir.

Entre ces deux états, le substrat est isolé : les échanges de cations entre les deux phases vérifieront donc toujours des égalités de la forme :

$$\mathcal{M}([\overline{Ca}]_E - [\overline{Ca}]_1) = - \mathcal{V}([Ca]_E - [Ca]_1) .$$

En combinant les cinq égalités analogues et en introduisant les nouveaux paramètres, nous établissons les cinq relations indépendantes :

$$\mathcal{M}(\overline{C}_E - \overline{C}_1) + \mathcal{V}_1(C_E - C_1) = 0 \qquad (6)$$

$$\mathcal{M}(\overline{C}_E - \overline{C}_1) - \mathcal{V}_1[(H)_E - (H)_1] = 0 \qquad (7)$$

$$\mathcal{M}(\overline{C}_E\, \overline{x}_E - \overline{C}_1\, \overline{x}_1) + \mathcal{V}_1(C_E\, x_E - C_1\, x_1) = 0 \qquad (8)$$

$$\mathcal{M}(\overline{C}_E\, \overline{x}_E\, \overline{y}_E - \overline{C}_1\, \overline{x}_1\, \overline{y}_1) + \mathcal{V}_1(C_E\, x_E\, y_E - C_1\, x_1\, y_1) = 0 \qquad (9)$$

$$\mathcal{M}[\overline{C}_E\, \overline{z}_E(1 - \overline{x}_E) - \overline{C}_1\, \overline{z}_1(1 - \overline{x}_1)] + \mathcal{V}_1[C_E\, z_E(1 - x_E) - C_1\, z_1(1 - x_1)] = 0. \qquad (10)$$

Les deux premières se rapportent à l'échange global entre les cations métalliques et le proton, et les trois suivantes aux échanges entre monovalents et divalents, entre K et NH_4, et entre Ca et Mg enfin.

Si le transfert de matière consiste en une addition d'hydroxyde, la relation (7) doit être remplacée par la relation :

$$\mathcal{M}(\overline{C}_E - \overline{C}_1) + \mathcal{V}_1[(OH)_E - (OH)_1] = 0 \qquad (11)$$

qui exprime que la disparition en solution d'une quantité d'ions OH est accompagnée de l'adsorption d'une quantité équivalente de cations.

Que les additions d'acide ou de base soient faibles ou élevées, les activités $(H)_E$ et $(OH)_E$ sont négligeables vis-à-vis de $(H)_1$ et $(OH)_1$ comme le montrent les deux

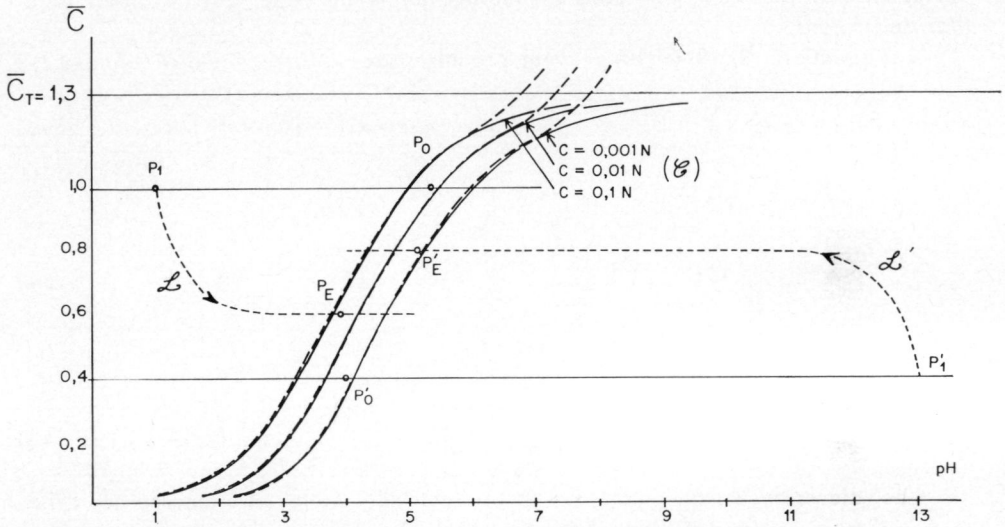


FIG. 1. — *Effet sur le substrat de l'addition d'acide fort ou de base forte dans la solution.*
Trois courbes d'équilibre d'équation (1) sont représentées pour C = 0,1 N ; 0,01 N ; 0,001 N et x = 0 (courbes C). (Les courbes expérimentales apparaissent en tireté.)
Addition d'acide au substrat en équilibre figuré par P_0 : point fictif P_1 ; quand l'acide réagit sur la tourbe neutralisée, le pH remonte et $\overline{C}$ diminue, ces deux paramètres restant liés par la relation :

$$pH = \log \mathcal{V}_1/\mathcal{M} - \log[(\overline{C} - \overline{C}_1) + \mathcal{V}_1/\mathcal{M}(H)_1]$$

expression logarithmique de l'équation (7) et équation de la courbe $\mathfrak{L}$, lieu du point représentatif du substrat au cours de cette réaction. Equilibre final P_E : $(H)_E \ll (H)_1$.
Addition de base : L'équilibre initial du substrat est ici P'_0, le point fictif est P'_1 et l'équilibre final P'_E : on a : $(OH)_E \ll (OH)_1$.
L'équation de $\mathfrak{L}'$ s'établit à partir de l'équation (11).

Effect of the addition of strong acid or base in the solution.
Three curves of equation (1) are drawn for C = 0,1 N — 0,01 N — 0,001 N : they fit the experimental curves (dashed lines) for $\overline{C} < 1{,}2$.
Addition of acid : initial equilibrium P_0. Fictitious point P_1. As acid reacts with neutralized peat, pH goes up and $\overline{C}$ diminishes, these parameters remaining bound by the equation of $\mathfrak{L}$:

$$pH = \log \mathcal{V}_1/\mathcal{M} - \log[(\overline{C} - \overline{C}_1) + \mathcal{V}_1/\mathcal{M}(H)_1]$$

which is the logarithmic form of equation (7). $\mathfrak{L}$ is the locus of the representative point of the substrate during the reaction. Final equilibrium point P_E : $(H_E) \ll (H_1)$.
Addition of base : initial equilibrium P'_0. Fictitious point P'_1. Final equilibrium P_E : $(OH)_E \ll (OH)_1$

exemples de la figure 1. Par suite, nous utiliserons sans erreur notable, les équations suivantes au lieu de (7) et (11).

$$\mathcal{M}(\bar{C}_E - \bar{C}_1) + \mathcal{V}_1(H)_1 = 0 \qquad (7bis)$$

$$\mathcal{M}(\bar{C}_E - \bar{C}_1) - \mathcal{V}_1(OH)_1 = 0\,. \qquad (11bis)$$

S'il n'y a pas d'addition d'acide ou de base, on pourra considérer que $\bar{C}$ est pratiquement constante entre le point fictif et le point d'équilibre, de même que C, compte tenu de (6) :

$$\bar{C}_E = \bar{C}_1$$
$$C_E = C_1\,.$$

Il n'en sera pas nécessairement de même du pH qui peut évoluer, en raison des variations possibles de x, mais dans une mesure qui ne met en jeu que de faibles quantités de protons.

Les équations (8), (9) et (10) peuvent être mises sous la forme linéaire (annexe 2) :

$$\bar{x}_E - \bar{x}_1 = A(x_E - x_1) + B = -\frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{M}} \cdot \frac{C_E}{\bar{C}_E} \cdot (x_E - x_1) + \left(1 - \frac{\bar{C}_1}{\bar{C}_E}\right)(x_1 - \bar{x}_1) \qquad (8bis)$$

$$\bar{y}_E - \bar{y}_1 = A'(y_E - y_1) + B' = -\frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{M}} \cdot \frac{C_E}{\bar{C}_E} \cdot \frac{x_E}{\bar{x}_E} \cdot (y_E - y_1) + \left(1 - \frac{\bar{C}_1 \bar{x}_1}{\bar{C}_E \bar{x}_E}\right)(y_1 - \bar{y}_1) \qquad (9bis)$$

$$\bar{z}_E - \bar{z}_1 = A''(z_E - z_1) + B'' = -\frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{M}} \cdot \frac{C_E}{\bar{C}_E} \cdot \frac{(1 - x_E)}{(1 - \bar{x}_E)}(z_E - z_1) + \left[1 - \frac{\bar{C}_1(1 - \bar{x}_1)}{\bar{C}_E(1 - \bar{x}_E)}\right](z_1 - \bar{z}_1)\,. \qquad (10bis)$$

Les valeurs des coefficients A, B... B″ sont calculées au fur et à mesure que celles de $\bar{C}_E$, C_E, $\bar{x}_E$, x_E le sont elles-mêmes.

4. — *Prévision de l'équilibre final*

Les valeurs numériques des paramètres de l'équilibre final (indice E) sont les solutions du système d'équations récapitulé ci-dessous :

- $\mathcal{M}(\bar{C}_E - \bar{C}_1) + \mathcal{V}_1(H)_1 = 0$ (7*bis*)
- $\mathcal{M}(\bar{C}_E - \bar{C}_1) + \mathcal{V}_1(C_E - C_1) = 0$ (6)
- $\bar{x}_E - \bar{x}_1 = A(x_E - x_1) + B$ (8*bis*)
- $\dfrac{\bar{x}_E^2}{1 - \bar{x}_E} = 0{,}5 \cdot \dfrac{C_E}{\bar{C}_E} \cdot \dfrac{x_E^2}{1 - x_E}$ (3)
- $\bar{y}_E - \bar{y}_1 = A'(y_E - y_1) + B'$ (9*bis*)
- $y_E = y_E$ (4)
- $\bar{z}_E - \bar{z}_1 = A''(z_E - z_1) + B''$ (10*bis*)
- $\dfrac{\bar{z}_E}{1 - \bar{z}_E} = 2 \cdot \dfrac{z_E}{1 - z_E}$ (5)
- $pH_E = 3{,}05 + 1{,}27 . \log \dfrac{\bar{C}_E}{(1{,}3 - \bar{C}_E)^2} - 0{,}50 \log \gamma . C_E(1 - x_E)\,.$ (2)

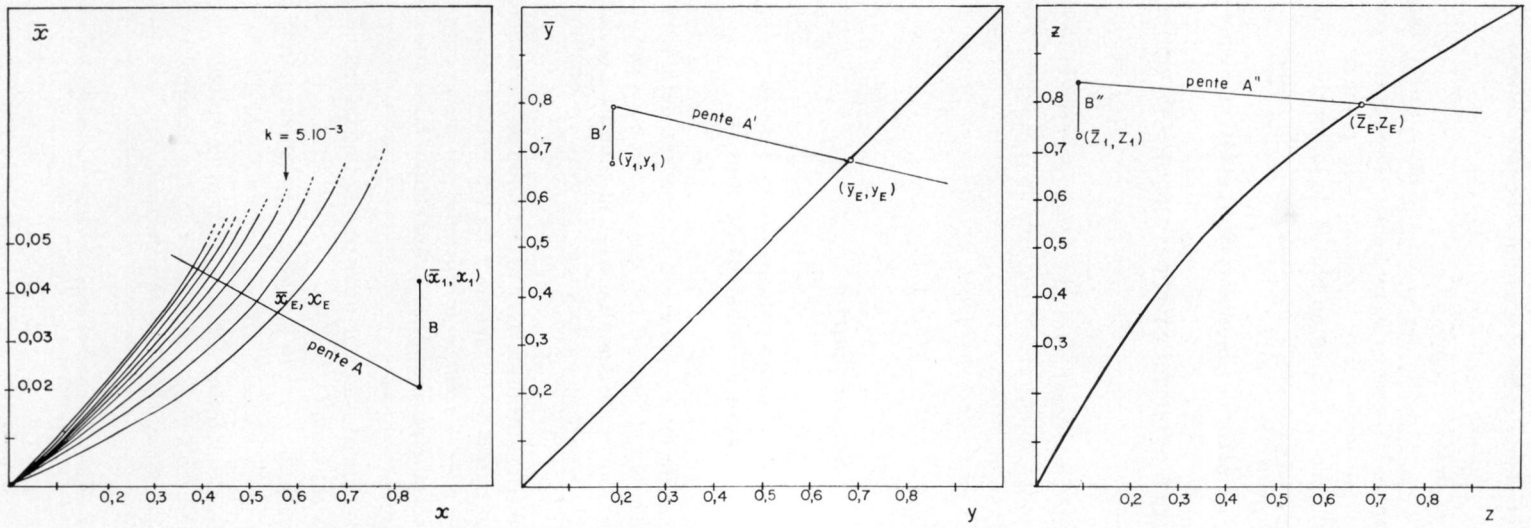


FIG. 2. — *Représentation graphique des équilibres monovalents-divalents* (gauche) *des équilibres K-NH*$_4$ (centre) *et Ca-Mg* (droite).

Dans les coordonnées $\bar{x}$, x, figurent quelques isothermes d'équation (3) pour les valeurs suivantes du coefficient $k = 0{,}5\ C/\bar{C}$: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.10^{-3}, ainsi que la droite d'équation (8*bis*) de pente — A, passant à la distance B du point $(\bar{x}_1, x_1)$ pour $x = x_1$.
Dans les coordonnées $\bar{y}$, y et $\bar{z}$, z, sont tracées respectivement l'isotherme d'équation (4) avec la droite d'équation (9*bis*) et l'isotherme d'équation (5) avec la droite d'équation (10*bis*).

Graphical representation of mono-divalent (left), *potassium-ammonium* (middle) *and calcium-magnesium* (right) *equilibria.*

Left : some curves of eq. (3) for $k = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.10^{-3}$. Straight line of eq. (8*bis*) of slope (— A) passing at distance B from point $(\bar{x}_1, x_1)$ for $x = x_1$. *Middle* : curve of eq. (4) and straight line of eq. (9*bis*). *Right* : curve of eq. (5) and straight line of eq. (10*bis*).

Les inconnues de ce système sont déterminées dans l'ordre suivant :

— calcul de $\overline{C}_E$, puis de C_E par les équations (7*bis*) et (6) ;

— calcul des coefficients A, B, et $k = 0{,}5.\ C_E/\overline{C}_E$;

— détermination de $\overline{x}_E$ et x_E à partir des équations (8*bis*) et (3), soit par une méthode numérique (l'équation du 3e degré en $\overline{x}_E$ ou x_E peut être résolue par itération à l'aide d'une calculatrice) soit par une méthode graphique (le point de coordonnées $\overline{x}_E$, x_E est à l'intersection de la droite d'équation 8*bis* et de la courbe d'équation (3) choisie dans un abaque ou interpolée à partir des courbes de l'abaque *) ;

— calcul des coefficients A', B', A'' et B'' ;

— détermination de $\overline{y}_E$, y_E à partir des équations (9*bis*) et (4) soit numériquement, soit graphiquement ;

— détermination de $\overline{z}_E$, z_E à partir des équations (10*bis*) et (5) soit numériquement, soit graphiquement ;

— calcul final de pH.

Les courbes expérimentales représentatives des équations (3), (4) et (5) ont été publiées (André, 1977). Elles sont sommairement reprises dans la figure 2 qui illustre la méthode de résolution graphique ci-dessus.

Dans la seconde partie sont traitées plusieurs applications pratiques de cette méthode de prévision.

Seconde partie

Déplacements des équilibres d'échange cationique lors de la préparation, puis de l'utilisation de substrat de tourbe

La tourbe de sphaignes brute est un matériau acide, très désaturé : $\overline{C}$ est de l'ordre de 0,2 eq/kg seulement (Mg et Ca) ; à son contact, les solutions fertilisantes s'acidifient par échange à un degré incompatible avec la plupart des cultures ; ils convient donc de la neutraliser avant d'entreprendre la mise en équilibre avec la solution nutritive.

Cette tourbe est généralement neutralisée avec la chaux ou un carbonate calcique ou dolomitique jusqu'à ce que $\overline{C}$ soit de l'ordre de 1 éq/kg. Elle est ensuite mise en équilibre d'échange cationique avec la solution fertilisante, par bassinages successifs.

En ce qui concerne cet aspect important de la préparation, nous nous proposons de répondre aux deux questions suivantes :

— Combien de bassinages faut-il effectuer pour que la tourbe soit effectivement en équilibre avec la solution fertilisante ?

— Le résultat est-il différent selon que la tourbe est neutralisée par la chaux (ou le calcaire) ou par la dolomie ?

Convenablement préparé, le substrat est irrigué par la solution pendant la culture. Le rythme d'irrigation doit en principe couvrir les besoins en eau et en éléments minéraux de la végétation qui s'alimente principalement aux dépens de la

(*) Cet abaque a été établi pour des valeurs de k comprises entre 10^{-3} et 10^{-2} à l'aide de tables traçantes, par A. Morisot, R. Bianconi et P. Kirkham. Nous les en remercions.

solution ; mais l'accord entre les apports et les besoins n'est pas aisé à maintenir et à contrôler.

Aussi, examinons-nous, en second lieu, dans quelle mesure la tourbe elle-même, par l'intermédiaire du pool important des cations adsorbés, peut compenser telle ou telle modification de la composition de la solution, et dans quelle mesure cet effet-tampon doit être compté parmi les avantages de la tourbe au regard des substrats chimiquement inertes.

A. — *Préparation du substrat*

1. — *Données relatives à la tourbe.*

Cette tourbe brute contient environ 0,15 éq de Mg et 0,05 éq de Ca par kg ; elle est additionnée de 0,90 éq de chaux, calcaire ou dolomie, ce qui équivaut, soit à 0,90 éq de Ca, soit à 0,45 éq environ de chacun des cations Ca et Mg.

Les paramètres de la tourbe auront pour valeur initiale :

$$\overline{C} = 1{,}10 \; ; \quad \overline{x} = 0 \; ; \quad \overline{y} \text{ indéterminé} \; ; \quad \overline{z} = 0{,}455 \text{ ou } 0{,}863 \, .$$

2. — *Données relatives à la solution fertilisante.*

La solution choisie contient les cations K, NH_4, Ca, Mg, aux concentrations respectives de 3, 1, 5, 2.10^{-3} éq/l et sa composition anionique est supposée sans influence sur les échanges cationiques.

Les valeurs numériques des paramètres de cette solution sont les suivants :

$$C = 11.10^{-3} \; ; \quad x = 0{,}364 \; ; \quad y = 0{,}750 \; ; \quad z = 0{,}714 \; ; \quad pH = 7{,}0 \, .$$

3. — *Données relatives aux bassinages.*

Nous supposons que chaque bassinage renouvelle entièrement la solution et qu'entre deux bassinages, l'équilibre d'échange a le temps de s'établir uniformément dans tout le volume du substrat : ainsi défini, ce processus est plus « efficace » que le processus réel, quel que soit le soin apporté à l'opération et les résultats calculés sont à considérer comme un optimum.

La capacité de rétention pour l'eau, par la tourbe, dans ces conditions de bassinage renouvelé, est estimée de l'ordre de 8 l par kg de matière sèche, soit $\mathcal{U}/\mathcal{M} = 8$.

Les valeurs numériques indiquées ci-dessus (premier état fictif) permettent de prévoir l'équilibre résultant du premier bassinage. Le nouvel état de saturation cationique de la tourbe sert de point de départ au calcul de l'équilibre suivant avec la solution renouvelée et ainsi de suite.

4. — *Résultat de la prévision.*

Le nombre de bassinages à effectuer pour que la solution fertilisante conserve sa composition initiale au contact de la tourbe dépend du mode de neutralisation de celle-ci (fig. 3).

Quand la dolomie est utilisée, le rapport Ca/Mg de la solution est durablement perturbé, puisque après le cinquième bassinage, le rapport Ca/Mg n'est que le quart

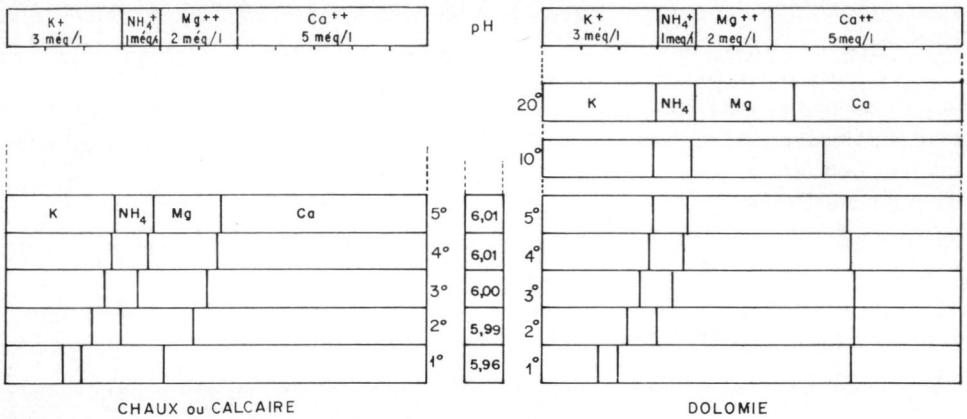


FIG. 3. — *Equilibrage de la solution fertilisante avec la tourbe selon le mode de neutralisation.*

Dans les rectangles supérieurs, les chiffres (3), (1), (2), (5) sont les concentrations de K, NH_4, Mg et Ca dans la solution préparée, en méq/l. Les rectangles inférieurs donnent, à la même échelle, la composition des drainages successifs (1er, 2e, 3e... 10e, 20e) au cours des bassinages, en supposant qu'il n'y a pas mélange entre les apports successifs de solution. Les pH calculés sont également indiqués.

Exchange equilibration of the nutrient solution with the peat according to modalities of neutralization.

Upper rectangles : initial composition of the solution.
Under rectangles : with the same scale, composition of the successive leachates.
Left : neutralization with $Ca(OH)_2$ or $CaCO_3$. *Right* : neutralization with $CaCO_3$, $MgCO_3$.
The calculated pH are the same for each case.

de ce qu'il devrait être : plus de vingt bassinages seraient nécessaires pour atteindre l'équilibre final ; il suffirait d'en effectuer environ cinq pour l'atteindre lorsque l'on utilise la chaux ou le calcaire, pourvu que la tourbe contienne une quantité initiale suffisante de magnésium.

Il convient donc de neutraliser la tourbe de telle sorte que les quantités de Ca et Mg adsorbées soient au départ les plus voisines de celles que définit l'équilibre final déterminé lui-même par la composition de la solution fertilisante : l'emploi de la chaux conduit ici à un rapport fortuitement favorable de ces deux cations, tandis que celui de la dolomie entraîne un déséquilibre Ca/Mg prolongé.

Lorsque l'équilibre définitif est atteint, les valeurs numériques calculées des paramètres du substrat sont les suivantes :

$$\overline{C} = 1{,}1 \quad ; \quad \bar{x} = 0{,}032 \; ; \quad \bar{y} = 0{,}75 \; ; \quad \bar{z} = 0{,}833$$
$$C = 0{,}011 \; ; \quad x = 0{,}364 \; ; \quad y = 0{,}75 \; ; \quad z = 0{,}714 \; ; \quad pH = 6{,}01 \; .$$

5. — *Vérification expérimentale.*

Un échantillon de tourbe brute humide (0,1 kg de matière sèche et $\mathcal{U}/\mathcal{M} = 3{,}6$), neutralisé par la dolomie, est mis en contact avec une solution contenant les cations K, NH_4, Ca, Mg aux concentrations précédentes. Après l'élimination par filtration sur Büchner de la phase liquide qui est analysée, et la pesée de la quantité résiduelle de liquide retenue par la tourbe, celle-ci est remise en contact avec un nouveau volume de solution. Cette opération est répétée deux fois.

On pourra comparer dans le tableau 1 les compositions calculées et dosées des trois phases liquides successives (l'humidité initiale de la tourbe et les quantités de solution retenues sont prises en compte dans le calcul).

TABLEAU 1

Vérification expérimentale : comparaison entre les compositions calculées et mesurées de la phase liquide exprimée en méq/l

First experimental verification : forecasted and measured composition of the solution (meq/l)

		Après le 1er équil. (After the 1st equil.)		Après le 2e équil. (After the 2nd equil.)		Après le 3e équil. (After the 3rd equil.)	
		calculé forecasted	dosé measured	calculé forecasted	dosé measured	calculé forecasted	dosé measured
Solution	[K] ...	1,15	1,10	2,00	2,25	2,50	2,60
	[NH_4]	0,45	0,70	0,65	0,90	0,85	1,00
	[Ca] ...	2,00	2,10	2,65	2,80	2,75	3,10
	[Mg] ..	4,20	4,20	4,90	4,65	4,65	4,50
Total		7,80	8,10	10,20	10,60	10,75	11,20

Mis à part un écart relatif inexpliqué, sur la concentration de NH_4 après les deux premiers contacts, l'accord entre la prévision et l'expérience est, dans l'ensemble, satisfaisant.

B. — *Utilisation du substrat*

Nous supposons que l'équilibre entre la solution fertilisante et la tourbe est atteint et que l'humidité du substrat s'est abaissée à la valeur couramment mesurée *in situ*, de l'ordre de 80 p. 100 par rapport au produit humide (soit $\mathcal{U}/\mathcal{M} = 4$).

Nous nous proposons de mettre en évidence l'effet-tampon de la tourbe sur le pH et la concentration des cations métalliques de la solution lorsque celle-ci subit l'un des transferts de matière suivants :

1. Prélèvement de la moitié du volume d'eau.
2. Addition de 11.10^{-3} éq/l d'acide fort.
3. Prélèvement de tout le calcium sous forme de sel.
4. Prélèvement de tout le calcium, compensé par l'équivalent de protons.
5. Prélèvement de tout le potassium sous forme de sel.
6. Prélèvement de tout le potassium, compensé par l'équivalent de protons.

Les six équilibres d'échange qui se rétablissent dans le substrat à la suite de ces six opérations sont calculés à l'aide de la méthode précédente. Il suffit alors de comparer les nouvelles compositions de la solution avec celles qu'elle aurait si la tourbe n'intervenait pas (tabl. 2 et fig. 4).

La figure 4 illustre l'atténuation, due à la présence de la tourbe, des variations des rapports x (monovalents/concentration totale), y (potassium/potassium + ammonium), z (calcium/calcium + magnésium) et du pH de la solution, particulièrement lors des traitements 3 à 6.

Le tableau 2 et la figure 4 appellent quelques commentaires :

1. Le prélèvement d'eau fait augmenter de 100 p. 100 la concentration totale des cations en présence ou en absence de tourbe. Mais la concentration des monovalents s'accroît de 60 p. 100 seulement et celles des divalents de 120 p. 100 en sa présence, du fait de la réaction d'échange. Une dilution à l'eau pure provoquerait le phénomène inverse : la proportion des monovalents diminuerait moins vite que celle des divalents. C'est ce que Bear décrit dans la formule plaisante : « Le soleil fait rentrer le potassium, la pluie le fait sortir. »

TABLEAU 2

Composition calculée de la solution après chacun des six transferts de matière

Forecasted composition of the solutions after each of the six transferences of matter

	Transferts de matière											
	1		2		3		4		5		6	
	(1)	(E)	(1)	(E)	(1)	(E)	(1)	(E)	(1)	(E)	(1)	(E)
[K]	6	4,90	3	4,00	3	2,25	3	3,00	0	1,90	0	2,10
[NH_4]	2	1,60	1	1,40	1	0,75	1	1,00	1	0,85	1	1,20
[Ca]	10	11,00	5	11,80	0	2,10	0	4,85	5	3,75	5	5,40
[Mg]	4	4,50	2	4,80	2	0,90	2	2,15	2	1,50	2	2,40
[H]	ε	ε	11	ε	ε	ε	5	ε	ε	ε	3	ε
Total	22		22		6		11		8		11	

Colonne (1) : avant réaction de la tourbe (état fictif).
Colonne (E) : après réaction de la tourbe (état d'équilibre).
Lorsque les pH sont voisins de 6, la concentrations de H est négligeable (ε).
(1) and (E) : respectively before and after reaction of the peat.
Concentration of H is negligible (ε) as pH is close to 6.

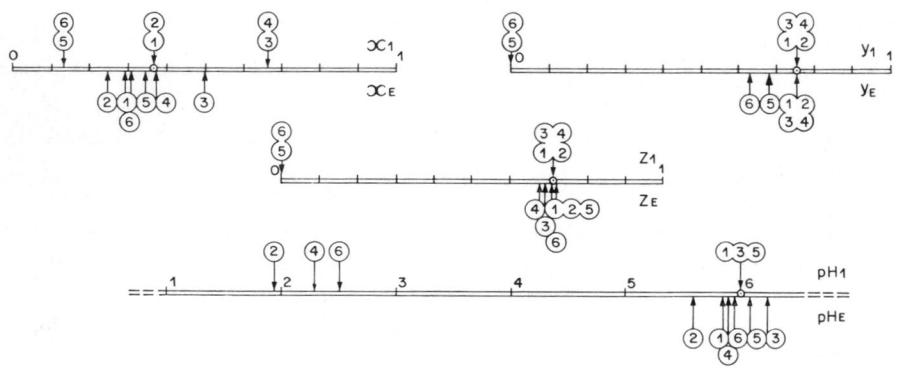


FIG. 4. — *Effet tampon de la tourbe sur les valeurs de x, y, z et du pH de la solution.*

Après les six transferts de matière indiqués dans le texte, les compositions de la solution sont figurés par les points 1 à 6 supérieurs (x_1, y_1, z_1, pH_1) avant la réaction de la tourbe, et par les points 1 à 6 inférieurs (x_E, y_E, z_E, pH_E) après la réaction de la tourbe.

Buffer effect of the peat on the composition of the solution (x, y, z and pH).

Upper and under values are respectively the composition of the solutions 1 to 6 before and after the reaction of peat.

Cet effet de la tourbe sur la composition peut être éventuellement défavorable : c'est le seul cas parmi ceux que nous examinons.

2. L'acide introduit est presque intégralement neutralisé par la tourbe : la concentration cationique s'en trouve doublée. Les cations monovalents et divalents passent en solution dans une proportion intermédiaire entre celles dans lesquelles ils se trouvent adsorbés dans la tourbe et en solution.

3. Le prélèvement de Ca ou K sous forme de sel simule une absorption racinaire de cations et d'anions en quantités équivalents : la tourbe n'a aucun effet sur la diminution de la concentration totale de la solution, mais corrige notablement le déséquilibre provoqué dans sa composition.

4. Le prélèvement de Ca ou K seul rompt la neutralité électrique de la solution, qu'on suppose rétablie par l'excrétion racinaire d'une quantité équivalente de protons : dans ce cas, les échanges avec la tourbe compensent la diminution de la concentration totale de la solution et rétablissent sa composition à une valeur voisine de la normale.

La composition cationique de la solution et son pH sont donc bien tamponnés par la tourbe, même lorsque les transferts de matière sont importants. Les deux observations précédentes montrent les effets différents d'un prélèvement de cation selon qu'il est accompagné ou non d'un prélèvement simultané d'anion : on peut voir là une interaction entre la nutrition anionique et la concentration de la solution du substrat : si la plante absorbe plus de cations que d'anions, le déficit cationique est compensé par la tourbe qui maintient stable à la fois la concentration totale et le pH ; inversement, si elle absorbe plus d'anions que de cations en excrétant des hydroxyles OH^- ou des anions HCO_3^- de compensation électrique (Heller) on peut prévoir la disparition par adsorption sur la tourbe, de l'excédent de cations : la concentration totale diminuera, mais le pH de la solution n'augmentera pas.

Vérification expérimentale.

Cinq prises d'essai de tourbe neutralisée ($\mathcal{M} = 10$ g ; $\overline{C} = 1{,}0$) sont mises en équilibre avec une même solution à 5 méq/l KCl et 5 méq/l $CaCl_2$.

La quantité de solution retenue est de 60 ml ($\mathcal{V}/\mathcal{M} = 6$). Chacune est soumise à l'un des traitements suivants :

1. Evaporation à l'air de la moitié du volume d'eau retenue.
2. Addition d'un volume d'eau égal au volume retenu.
3. Addition d'une quantité de HCl égale à celle des cations en solution.
4. Elimination par centrifugation de 50 ml de solution remplacés par un volume égal de solution à 5 méq/l KCl seul.
5. Elimination d'un même volume remplacé par 50 ml de solution à 5 méq/l de $CaCl_2$ seul.

Les prises d'essai sont homogénéisées, tassées et conservées en récipients fermés pendant 48 h, puis la solution est extraite et analysée.

On pourra comparer dans le tableau 3 les valeurs prévues et mesurées des fractions ioniques x de K en solution et du pH.

Cet exemple simple, qui illustre l'effet-tampon de la tourbe, montre que la prévision et l'expérience conduisent à des résultats très comparables.

TABLEAU 3

Vérification expérimentale des prévisions d'équilibre d'un système dicationique soumis à cinq transferts de matière

Second experimental verification : forecasted and measured composition of the solution (x, pH) *when the dicationic system is submitted to five different transferences of matter*

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	pH_3
Valeur mesurée	0,43	0,56	0,31	0,44	0,62	4,94
Valeur calculée.....	0,42	0,57	0,32	0,48	0,63	5,07

Conclusion

La méthode de prévision mise en œuvre tente de relier les principaux facteurs qui interviennent dans les équilibres cationiques au sein d'un substrat de tourbe, afin de pouvoir en prévoir le comportement. Par suite, elle juxtapose par nécessité des équations empiriques d'équilibre établies précisément pour ce matériau, à partir, il est vrai, d'un modèle d'équation très général, et des équations rigoureuses de conservation des ions en cours d'échange.

Dans l'introduction de la Première Partie et l'Annexe, nous avons bien précisé les nombreuses approximations et hypothèses faites pour rendre cette méthode aisément utilisable dans certaines limites de composition du substrat. Aucune autre méthode n'existant à notre connaissance, qui prenne en compte le proton et plusieurs cations métalliques, les critères d'appréciation sont les vérifications expérimentales dont nous donnons ici deux exemples.

Du point de vue pratique, cette étude montre que l'effet-tampon de la tourbe doit être utilisé comme un avantage, dès le stade de la préparation du substrat : la neutralisation doit être considérée comme une opération importante, si l'on veut éviter que la solution fertilisante préparée pour satisfaire les besoins d'une culture ne soit perturbée durablement par le contact avec la tourbe ; en outre, les prélèvements cationiques peuvent être partiellement compensés par des réactions d'échange, réactions d'autant plus utiles que le substrat est moins souvent fertilisé (substrats pour plantes en pot notamment).

Une étude en cours permettra de déterminer dans quelle mesure l'altération avec le temps de la tourbe et certaines réactions à cinétique lente pourront modifier certaines données de cette méthode.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Remerciements

Nous avons tenu le plus grand compte des remarques et des suggestions que nous ont faites nos Collègues J. Chaussidon (†) (Science du Sol, I.N.R.A. Versailles), R. Guennelon (Science du Sol, I.N.R.A. Montfavet) et R. Prost (Science du Sol, I.N.R.A. Versailles).

Summary

Forecasting the exchange equilibria between four cations in a sphagnum peat medium

The distributions of cations Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}, NH^{+} are studied in the two phases of a medium for plant growth made with sphagnum peat and nutrient solution. A method let us forecast the exchange equilibria and estimate the buffer-effect of the peat as the composition of solution is perturbed by addition or deduction of water, salts, ions... simulating fertilization, irrigation, weather-effect and root absorption.

Zusammenfassung

Vorraussicht der Austauschgleichgewichte zwischen vier Kationen in einem Sphagnumtorfsubstrat

Mit Hilfe einer Voraussichtsmethode für die Austauschgleichgewichte werden die Verteilungen der K, NH_4, Ca, Mg Kationen in den festen und flüssigen Phasen eines Kultursubstrats aus Torf und einer Düngelösung untersucht .Der Puffereffekt des Torfes wurde aufgezeigt, wenn die Zusammensetzung der Lösung durch den Zusatz oder die Entnahme von Wasser oder Ionen gestört wurde, die die Fruchtbarmachung, die Bewässerung, den Klimaeffekt und die Wurzelaufnahme vortäuschen.

РЕЗЮМЕ

Прогноз равновесных состояний при обмене четырех катионов в торфяном субстрате сфагнумов.

АНДРЕ Ж. П.

С помощью метода прогноза равновесных состояний обмена, изучалось распределение катионов К, $ИН_4$, Са и Mg в твердой и жидкой фазах субстрата культуры, состоявшего из торфа и питательного раствора. Выявлен был буферный эффект торфа при изменениях питательного раствора, вызванных прибавлением, или из'ятием некоторого количества воды, или ионов, симулировавших удобрение, орошение, климатические эффекты и поглощение корнями.

Références bibliographiques

ANDRÉ J. P., 1970. Isothermes d'échange ionique sur les sols et les réseaux de concentration. *Ann. agron.*, **21** (6), 703-724.

ANDRÉ J. P., 1975. Graphical representation of tricationic exchanges where one of the cations is the proton. *J. Soil Sci.*, **26** (1), 81-92.

ANDRÉ J. P., 1976. Les propriétés d'échangeur cationique de la tourbe de Sphaignes. Echanges bicationiques entre le proton et un cation métallique. *Ann. agron.*, **27** (1), 17-31.

ANDRÉ J. P., 1977. Cation exchange properties of sphagnum peat : exchanges between two metallic cations and protons. *J. Soil Sci.*, **28** (4), 573-584.

BEAR F. E., 1955. *Chemistry of soil* (p. 130), Rheinhold, New York.

HELFFERICH F., 1962. *Ion Exchange*, Mc Graw Hill, New York.

HELLER R., 1969. *Biologie Végétale*, tome 2, Masson, Paris.

Annexe 1

Les équations d'équilibre utilisées sont établies à partir des résultats expérimentaux déjà publiés qu'on peut résumer de la manière suivante :

Equilibres monocationiques (K, NH_4, Ca ou Mg)

Tout équilibre entre la tourbe et une solution monocationique est défini par la quantité $\bar{C}$ du cation adsorbé, l'activité γC de ce cation et l'activité (H) du proton en solution. Si l'ionisation de la première fonction acide de la tourbe n'est pas dépassée, on peut établir selon la valence du cation, les relations empiriques (André, 1976, pp. 27 et 28) :

$$\left[\frac{\bar{C}}{(\bar{C}_T - \bar{C})}\right]^{2,40} = 10^{-3,60} \cdot \frac{\gamma C}{(H)} \text{ pour la valence 1} \qquad (a)$$

$$\left[\frac{\bar{C}}{(\bar{C}_T - \bar{C})^2}\right]^{2,55} = 10^{-11,2} \cdot \frac{\gamma C}{(H)^2} \text{ pour la valence 2 .}$$

Si l'on exprime $\bar{C}$ et $\bar{C}_T$ en éq/kg et non en méq/100 g, cette seconde équation s'écrit :

$$\left[\frac{\bar{C}}{(\bar{C}_T - C)^2}\right]^{2,55} = 10^{-6,1} \cdot \frac{\gamma C}{(H)^2} \text{ pour la valence 2 .} \qquad (b)$$

La valeur numérique de $\bar{C}_T$ est 1,3 éq/kg.

Equilibres dicationiques (K-Ca ; K-NH_4 ; Ca-Mg)

Si les cations sont de même valence, les équations (*a*) et (*b*) sont valables, à condition de prendre en compte l'activité totale en solution.

Si les cations sont de valences différentes, nous observerons que tout se passe comme si le cation divalent était seul, tant que sa concentration n'est pas inférieure à 10-15 p. 100 de la concentration totale ; d'où l'emploi de l'équation suivante (André, 1977) :

$$\left[\frac{\bar{C}}{(\bar{C}_T - \bar{C})^2}\right]^{2,55} = 10^{-6,1} \cdot \frac{\gamma C(1 - x)}{(H)^2} \qquad (c)$$

dans laquelle (1 — x) est la fraction ionique du cation divalent en solution.

D'autre part, les fractions ioniques des deux cations dans les deux phases sont liées par les relations empiriques suivantes (André, 1977) :

$$\frac{\bar{x}^2}{1 - \bar{x}} = 0,4 \frac{C}{\bar{C}} \cdot \frac{x^2}{1 - x} \qquad \text{(système K-Ca)} \qquad (d)$$

$$\bar{y} = y \qquad \text{(système K-NH}_4\text{)} \qquad (e)$$

$$\frac{\bar{z}}{1 - \bar{z}} = 2 \cdot \frac{z}{1 - z} \qquad \text{(système Ca-Mg)} \qquad (f)$$

$\bar{x}$, x et $\bar{y}$, y étant les fractions ioniques de K dans les deux premiers systèmes $\bar{z}$, z, celles de Ca dans le troisième.

Equilibres tétracationiques (K, NH_4, Ca, Mg)

Aucune équation empirique n'a été établie. Nous avons donc posé les hypothèses suivantes dans le souci de la plus grande simplicité des calculs :

1. L'équation (*c*) est conservée, mais c'est l'activité totale des deux cations divalents qui est prise en compte.

2. La présence des cations K et NH_4 ne modifie pas l'équilibre entre les cations Ca et Mg et réciproquement : les équations (*e*) et (*f*) sont conservées.

3. L'équation (*d*) rendra compte de l'équilibre entre la somme des monovalents et la somme des cations divalents : $\bar{x}$ et x seront les sommes des fractions ioniques de K et NH_4 dans les deux phases, telles qu'elles sont définies dans ce mémoire.

Le coefficient numérique 0,4 est établi pour les équilibres K-Ca. L'application de la règle du triangle (Helfferich) conduirait à la valeur 0,8 pour les équilibres K-Mg : pour la plupart des applications numériques, nous choisirons la valeur 0,5 interpolée en fonction des proportions moyennes de Ca et Mg adsorbées.

Annexe 2

Passage de l'équation 8 *à l'équation* 8*bis*

$$\mathcal{M}(\bar{C}_E\,\bar{x}_E - \bar{C}_1\,\bar{x}_1) + \mathcal{V}_1(C_E\,x_E - C_1\,x_1) = 0\,. \qquad (8)$$

Nous développons :

$$\mathcal{M}\bar{C}_E\,\bar{x}_E - \mathcal{M}\bar{C}_1\,\bar{x}_1 + \mathcal{V}_1\,C_E\,x_E - \mathcal{V}_1\,C_1\,x_1 = 0\,.$$

Le terme $\mathcal{V}_1\,C_1\,x_1$ peut être tiré de l'équation (6) :
Si l'on multiplie tous les termes de l'équation (6) par x_1, on trouve :

$$\mathcal{M}\bar{C}_E\,x_1 - \mathcal{M}\bar{C}_1\,x_1 + \mathcal{V}_1\,C_E\,x_1 - \mathcal{V}_1\,C_1\,x_1 = 0\,.$$

Nous en tirons une expression du terme $(-\mathcal{V}_1\,C_1\,x_1)$ que nous portons dans l'équation précédente :

$$\mathcal{M}\bar{C}_E\,\bar{x}_E - \mathcal{M}\bar{C}_1\,\bar{x}_1 + \mathcal{V}_1\,C_E\,x_E - \mathcal{M}\bar{C}_E\,x_1 + \mathcal{M}\bar{C}_1\,x_1 - \mathcal{V}_1\,C_E\,x_1 = 0\,.$$

Ajoutons et retranchons le terme $\mathcal{M}\bar{C}_E\,\bar{x}_1$:

$$\mathcal{M}\bar{C}_E(x_E - \bar{x}_1) + \mathcal{V}_1\,C_E(x_E - x_1) + \mathcal{M}\bar{C}_E(\bar{x}_1 - x_1) + \mathcal{M}\bar{C}_1(x_1 - \bar{x}_1)$$

ou :

$$\mathcal{M}\bar{C}_E(\bar{x}_E - \bar{x}_1) = -\mathcal{V}_1\,C_E(x_E - x_1) + \mathcal{M}(\bar{C}_E - \bar{C}_1)\,(x_1 - \bar{x}_1)$$

ou enfin :

$$\bar{x}_E - \bar{x}_1 = -\frac{\mathcal{V}_1\,C_E}{\mathcal{M}\bar{C}_E}(x_E - x_1) + \left(1 - \frac{\bar{C}_1}{\bar{C}_E}\right)(x_1 - \bar{x}_1)\,. \qquad (8bis)$$

Le calcul est analogue pour passer des équations (9) et (10) aux équations (9*bis*) et (10*bis*).

Ann. agron., 1978, **29** (6), 559-581.

Loi de variation du pH d'un sol acide après apport de particules calcaires de caractéristiques différentes

Ph. BUSSIÈRES

Station d'Agronomie I.N.R.A.,
Rue de Stang-Vihan 29000 Quimper

Résumé

Après avoir analysé les différents facteurs susceptibles d'agir sur la variation du pH d'un sol acide ayant reçu des amendements calcaires biodétritiques d'origine marine, cette variation du pH du sol est reliée au bilan du calcium, à son incidence sur le pH et à la cinétique de la dissolution des particules calcaires. On suppose celle-ci dépendre seulement de la surface des particules.

Les augmentations calculées du pH s'accordent avec les augmentations observées dans des dispositifs en pots et en case lysimétrique.

L'approche proposée peut aider à mieux raisonner le choix des doses, de la fréquence des apports et des caractéristiques des amendements calcaires. On note, par exemple, que des particules de forme plate, libérant vraisemblablement le calcium avec une vitesse constante au cours du temps, sont les plus aptes à compenser les pertes de calcium.

Introduction

On peut distinguer deux grands types d'utilisation des amendements calcaires. L'un a pour objectif d'améliorer les propriétés structurales des sols peu stables en raison des actions de climats et de techniques de culture sur une texture peu favorable. Des apports de calcium accroissent, en effet, la floculation et l'agrégation des éléments du sol en augmentant la perméabilité. Ces modifications ne sont toutefois sensibles que s'il en résulte une valeur suffisamment élevée du pH, de l'ordre de 7,5 à 8,0. Si le pH obtenu n'est voisin que de 7, la stabilité structurale peut, en effet, être inférieure à celle du même sol plus acide.

L'autre vise à améliorer les conditions chimiques d'alimentation minérale des cultures. L'augmentation de la quantité de calcium dans le sol s'accompagne, en effet, d'une diminution de l'assimilabilité d'éléments présents en trop grande quantité tels que Al et Mn. Celle de nombreux autres éléments est accrue (P, K, Ca, Mg, Mo). Parallèlement l'activité des bactéries du cycle de l'azote est favorisée. Finalement, le rendement des cultures est amélioré et la composition minérale modifiée dans un sens favorable, notamment dans le cas des fourrages. Cela n'est toutefois plus vrai lorsque le pH continue à s'élever. Certains éléments utiles (Mn, Zn, B) deviennent insuffisamment assimilables et des carences apparaissent.

Dans les sols acides de Bretagne, considérés ici, ce sont surtout ces conditions d'alimentation minérale qui semblent être prépondérantes. Il est alors préférable de limiter le pH du sol en deçà des seuils supérieurs de carences. Les travaux menés à la Station d'Agronomie de Quimper ont ainsi défini pour ces sols, un intervalle de pH optimum compris entre 6,0 et 6,5 (Coppenet, 1957).

Pour amener une terre acide dans un tel intervalle assez étroit de pH, ou pour l'y maintenir en dépit des pertes de calcium, il convient de bien maîtriser l'emploi des amendements calcaires. Dans ce but et pour mieux comprendre les variations à long terme du pH des sols, nous avons cherché à préciser, de façon quantitative et dynamique, certains effets des caractéristiques d'amendements calcaires.

Pour cela, nous avons disposé d'essais portant sur des sables calcaires biodétritiques marins récemment découverts par le Centre National pour l'Exploitation des Océans. Nous avons utilisé aussi des résultats d'une case lysimétrique du dispositif de la Station d'Agronomie de Quimper, ayant reçu un apport de maërl il y a plus de vingt ans (Coppenet, 1969 et résultats non publiés).

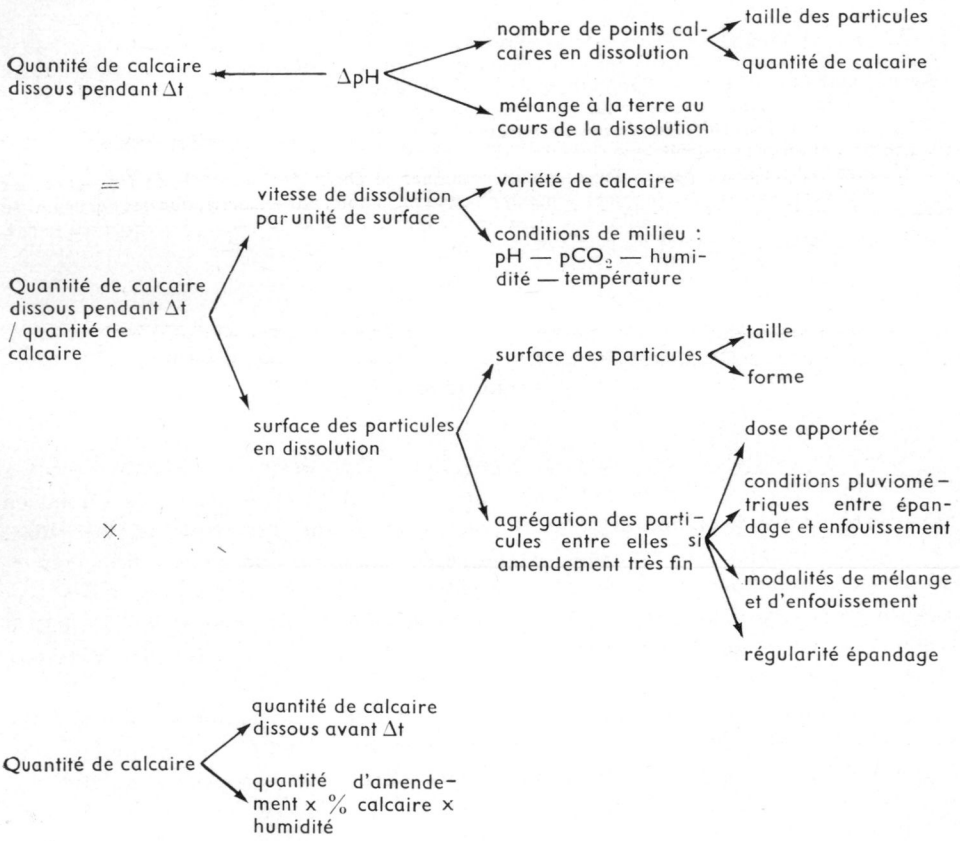


FIG. 1. — *Relations dont paraissent dépendre la dissolution d'amendements calcaires et la variation consécutive du pH du sol.*

Connections on which dissolution of limestones and variation consécutive of pH of soil seem to depend.

Matériel et méthodes

1. — *Les principaux facteurs susceptibles d'agir sur l'efficacité d'un amendement calcaire dans le sol*

La figure 1 rassemble les actions des principaux facteurs susceptibles d'agir sur la dissolution d'un amendement calcaire et l'augmentation consécutive du pH du sol.

Différents travaux ont, en effet, mis l'accent sur l'importance de la granulométrie et de la dureté des particules d'amendements calcaires quant à leur vitesse de dissolution. Certains les ont reliés à des résultats de tests de dissolution, soit en solution d'acide tartrique (Houdaille et Semichon, 1894 cité par Demolon, 1932), soit en solution d'acide acétique (Morgan et Salter, 1923), soit en solution carbonique ou d'oxalate d'ammonium (Lenglen et Durier, 1930 ; Drouineau, 1942 ; Boischot et Hébert, 1947 ; Barbier et Mauvisseau, 1950 ; Thomas et Gross, 1952). D'autres travaux ont été centrés sur leurs effets dans le sol, en pots de terre ou en parcelles, comparés éventuellement aux résultats de ces tests (Brioux, 1930 ; Meyer et Volk, 1952 ; Liwerant, 1953 ; Coppenet, 1957). Des observations personnelles nous donnent à penser, par ailleurs, qu'un calcaire très fin (inférieur à 200 μ), enfoui à forte dose après une pluie postérieure à l'épandage, peut former des agrégats calcaires assez durables dans le sol. L'efficacité du calcium dissous dans le sol sur le pH est apparue liée au degré d'homogénéité de sa répartition, donc à la granulométrie des particules calcaires dont il est issu (Chaminade, 1933). Nous pensons convenable d'en déduire que cette efficacité peut alors être liée aussi à la fréquence des mélanges des particules calcaires à la terre au cours de leur dissolution.

Dans cet ensemble de facteurs jouant sur l'efficacité d'un amendement calcaire, nous avons analysé, plus particulièrement, l'influence des caractéristiques des particules de calcaire.

2. — *Utilisation d'un modèle lorsque seules varient les caractéristiques des particules calcaires*

On peut établir le modèle ci-dessous pour décrire l'action des particules calcaires sur le sol lorsque seules varient leurs caractéristiques. Il fait intervenir :

— le bilan du calcium,
— la cinétique de dissolution des particules,
— l'incidence du calcium échangeable sur le pH.

a) *Bilan du calcium.*

La quantité de calcium à l'état échangeable à un temps t après un apport de calcaire à t_0 peut s'écrire :

$$\text{Ca éch}_t = \text{Ca éch}_{t_0} + \text{Ca apporté}_{t_0} - \text{Ca restant sous forme calcaire}_t - \text{Ca drainé}_{t_0 \text{ à } t} - \text{Ca exporté}_{t_0 \text{ à } t}. \quad (1)$$

Rapportée à la couche de terre arable (2 500 t/ha) la quantité de calcium échangeable d'un sol granitique de Bretagne varie de 1 000 kg/ha (terre abandonnée) à

5 000 kg/ha (terre bien cultivée). En cases lysimétriques cultivées, à Quimper, le calcium drainé annuellement est environ de 200 kg/ha. Selon les modalités d'exploitation les exportations en calcium peuvent varier de 20 à 100 kg/ha. Dans ce bilan devrait être aussi inclus le calcium contenu sous des formes plus ou moins libres dans certains engrais et dans les fumures organiques en provenance de l'extérieur.

b) *Cinétique de la dissolution des particules calcaires.*

Il s'agit d'évaluer la quantité de calcaire Q, restant sous forme de particules au temps t.

Nous avons émis l'hypothèse que la quantité de calcaire dissoute par unité de temps à partir des particules calcaires est seulement proportionnelle à leur surface.

Soit Q la masse de n particules de masse q, de surface s, de volume v, au temps t (et Q_0, q_0, s_0, v_0, ces mêmes grandeurs au temps initial t_0, moment auquel les particules sont incorporées au sol). Alors :

$$dq = -k.s.dt \qquad \text{et} \qquad dQ = -n.k.s.dt$$

où k est une constante positive égale à la quantité de calcaire dissoute par unité de surface et de temps.

Selon la forme des particules, cette relation a pour solution (voir annexe) :

$Q = Q_0\left(1 - \frac{2\,kt}{h_0\,\rho}\right)$, si les particules ont deux surfaces planes, parallèles et grandes par rapport à l'épaisseur initiale h_0 (on néglige donc les autres surfaces).

$Q = Q_0\left(1 - \frac{kt}{r_0\,\rho}\right)^2$, si les particules sont des cylindres allongés dont la surface des sections de rayon initial r_0 est négligeable devant la surface cylindrique.

$Q = Q_0\left(1 - \frac{kt}{r_0\,\rho}\right)^3$, si les particules sont des sphères de rayon r_0. ρ est la masse volumique du matériau. Ces fonctions n'ont un sens physique, ici, que si Q est nul ou positif, inférieur à Q_0. Cela signifie que $Q = 0$ si t est supérieur à $\frac{h_0\,\rho}{2\,k}$ ou $\frac{r_0\,\rho}{k}$.

Nous avons constaté que Swartzendruber et Barber (1965) ont modélisé de cette dernière façon la cinétique de dissolution de particules calcaires sphériques de même taille.

Si l'on considère un mélange de particules de caractéristiques initiales différentes, la masse de calcaire restant au temps t est la somme des masses restantes de chaque catégorie. Par exemple, dans le cas d'un mélange de particules cylindriques allongées, constituées du même matériau, dont $a_1\,Q_0/100$ ont pour rayon initial r_{01}, $a_2\,Q_0/100$ ont pour rayon initial r_{02}..., on peut écrire :

$$Q = Q_0 \sum_{i=1}^{i=m} \frac{a_i}{100}\left(1 - \frac{kt}{r_{0i}\,\rho}\right)^2 \qquad (2)$$

avec $a_i = 0$ si $t \geqslant r_{0i}\,\rho/k$ et m = nombre de fractions granulométriques.

Le rapport $Ca/CaCO_3$ étant égal à 0,40, la quantité de calcium restante au temps t est donc $0{,}40 \times Q$.

On peut remarquer que les dimensions d'une particule ne définissent qu'une surface apparente, fonction de l'échelle d'observation. Si celle-ci ne correspond pas à

l'échelle des phénomènes, les relations ci-dessus ne sont pas modifiées si, pendant toute la réaction, la surface vraie réagissante et la surface apparente restent dans le même rapport b. On peut en effet, alors, écrire :

$$dq = - k_{vrai} . s_{vraie} . dt$$

ou :

$$dq = - k_{vrai} . b . s_{apparente} . dt = - k_{apparent} . s_{apparente} . dt .$$

On observe (fig. 2) que les courbes S et C, représentatives des variations de Q dans les cas de particules sphériques et de particules cylindriques de même rayon initial r_0, sont très proches, par rapport à l'écart existant entre celles de particules de même forme dont les rayons sont dans le rapport 0,5 (C et C″ par exemple). Les droites P et P′ représentent les cas de particules plates de hauteur h_0, égale à 2 r_0 et r_0. Elles montrent que, si l'on assimile des particules plates de hauteur h_0, comprise entre r_0 et 2 r_0, à des particules cylindriques de rayon r_0, on approche assez bien la cinétique vraie, surtout en début de réaction.

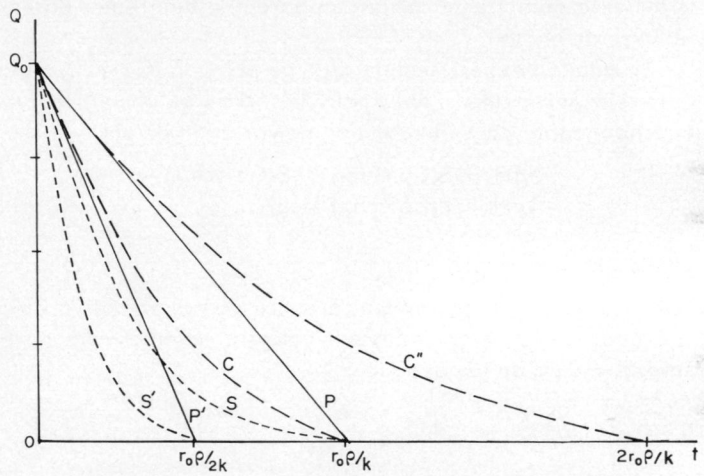


FIG. 2. — *Courbes représentatives des variations de la quantité de calcaire restante* (Q) *en fonction du temps* (t).

C et C″ : particules cylindriques de rayons initiaux r_0 et 2 r_0 ;
S et S′ : particules sphériques de rayons initiaux r_0 et $r_0/2$;
P et P′ : particules plates de hauteurs initiales 2 r_0 et r_0.

Representative curves of variations of residual quantity of limestone (Q) *with time* (t).

C et C″ : cylindric particules with initial rays r_0 and 2 r_0.
S et S′ : spheric particules with initial rays r_0 and $r_0/2$.
P et P′ : plate particules with initial thickness 2 r_0 and r_0.

c) *Incidence du calcium échangeable sur le pH du sol.*

Pour un sol donné, toutes autres choses égales, le pH est déterminé par la concentration du calcium retenu par le sol et contenu dans la solution du sol, c'est-à-dire la concentration en calcium mesurée par dosage du calcium échangeable.

Nous avons déterminé empiriquement la liaison existant, pour le sol mis en expérience, entre le pH et le calcium échangeable (2 h d'agitation dans de l'acétate d'ammonium molaire). Pour cela, nous avons opéré sur cette terre ayant reçu, plusieurs mois

auparavant, et à deux doses, différents calcaires dissous lors de la mesure (les mois suivants le pH de la terre n'augmente plus). Ce dernier point est important, car en présence de particules de ces calcaires, la mesure du calcium échangeable dissout du calcaire de façon non négligeable. En effet, les mesures du calcium échangeable de la terre expérimentée, immédiatement après apports de 9,13 meq Ca sous forme de particules plus ou moins fines, obtenues par concassage de la fraction 1,25-2,50 mm d'un des calcaires testés, sont les suivantes :

terre témoin	1,07 meq Ca/100 g
terre + fraction 1-1,25 mm	5,11 meq Ca/100 g
terre + fraction 0,500-0,630	6,45 meq Ca/100 g
terre + fraction 0,200-0,315	7,90 meq Ca/100 g

Par contre, l'extraction du calcium échangeable par la méthode utilisée peut être incomplète.

Nous avons comparé la relation ainsi obtenue à celle observée sur cette même terre, entre le pH et la quantité de calcium apportée, à différentes doses, sous forme de solution aqueuse de chaux.

A partir de la relation expérimentale du type pH = E (Ca éch.), valable dans la gamme des valeurs expérimentées, nous pouvons écrire qu'une variation de la quantité de calcium échangeable s'accompagne d'une variation de pH :

$$\Delta pH = E(\text{Ca éch.}_t) - E(\text{Ca éch.}_0)$$

ou

$$\Delta pH = E(\text{Ca éch.}_t) - pH_0 . \qquad (3)$$

d) *Expression de la variation du pH.*

Les relations (1), (2) et (3) permettent d'écrire que la variation du pH d'un sol ayant reçu une quantité Q_0 d'amendement calcaire, composé de particules cylindriques, au temps t = 0 est au temps t :

$$\Delta pH = E\left[\text{Ca éch.}_0 + 0{,}4\,Q_0 - 0{,}4\,Q_0 \sum \frac{a_i}{100}\left(1 - \frac{kt}{r_{0i}\,\rho}\right)^2 - \right.$$
$$\left. - \text{Ca drainé} - \text{Ca exp.}\right] - pH_0 .$$

Dans le cas où la relation pH = E (Ca éch.) peut être considérée comme linéaire, on obtient :

$$\Delta pH = 0{,}4\,\beta Q_0 - 0{,}4\,\beta Q_0 \sum_{i=1}^{i=m} \frac{a_i}{100}\left(1 - \frac{kt}{r_0\,\rho}\right)^2 - \beta\text{Ca drainé} - \beta\text{Ca exp.} \qquad (4)$$

avec $a_i = 0$, si $t \geqslant \frac{r_{0i}\,\rho}{k}$.

Il est à remarquer que l'on suppose implicitement la relation (3) vraie dans le cas de variation négative du calcium échangeable (drainage notamment).

3. — *Les amendements calcaires étudiés*

Ce sont trente-deux échantillons de sédiments biodétritiques calcaires accumulés en bancs sur les fonds marins au large de la Bretagne (bancs d'Ar Men, Four, Gorgegou et Ouessant) et prospectés par le Centre National pour l'Exploitation des Océans.

TABLEAU 1

Caractéristiques des échantillons calcaires (< 5 mm)

Characteristics of limestone samples (< 5 mm)

N° Echantillon	p. 100 calcaire	Granulométries (p. 100) — Fractions (mm)				Granulométries indiquées par le C.N.E.X.O.		Densité apparente conventionnelle	Solubilité carbonique
		0,160-0,315	0,315-0,500	0,500-1,000	1,000-5,000	< 0,315	> 1,000		
A 147	85	5,4	24,1	52,8	17,8	7,1	15,2	1,10	14,0
A 150	89	9,0	30,9	47,9	12,7	14,6	10,0	1,00	15,0
A 151	87	4,5	24,1	52,7	18,8	5,6	19,2	1,12	11,0
A 152	84	3,6	21,5	57,0	17,5	5,1	17,2	1,20	8,5
A 156	89	5,4	25,5	53,3	15,7	6,3	21,2	1,03	11,5
A 157	88	2,9	19,9	51,0	26,3	6,1	21,2	1,06	11,0
A 160	92	0,0	0,2	16,0	83,6	0,8	63,2	0,92	5,0
A 161	92	0,0	5,1	29,7	65,6	2,1	66,2	0,80	9,5
F 105	89	1,7	19,6	56,5	22,4	2,2	29,3	0,87	11,5
F 109	89	19,0	37,0	37,5	6,3	19,3	11,1	0,75	18,5
F 110	88	1,5	16,8	61,0	20,5	2,2	33,3	0,85	12,0
F 111	86	4,7	25,6	46,7	22,8	6,3	27,8	0,83	15,0
F 113	90	2,8	18,1	47,5	31,8	5,0	37,5	0,74	15,5
F 118	85	0,4	14,9	68,5	16,4	1,6	24,0	0,91	12,0
F 122	87	3,5	17,6	47,2	30,8	4,6	39,3	0,96	10,0
F 128	90	0,6	10,0	40,5	48,5	3,3	49,5	0,58	14,5
G 8.....	80	12,9	11,0	10,7	60,4	77,9	2,0	1,16	11,5
G 9.....	88	34,2	17,4	26,1	22,4	30,0	34,0	0,98	15,5
G 19.....	82	22,9	38,6	28,1	10,3	12,7	21,6	0,99	16,5
G 210.....	70	2,9	14,4	56,9	25,8	4,1	26,0	1,26	11,0
G 212.....	72	5,0	27,4	37,0	30,6	5,8	40,5	1,18	10,0
G 214.....	84	16,2	20,0	23,7	39,9	18,4	44,7	0,99	13,0
G 216.....	66	44,6	45,2	9,7	0,3	32,7	2,0	1,14	18,0
G 219.....	88	0,0	0,0	2,1	97,8	4,4	80,9	0,99	4,0
O 180	84	0,2	8,1	52,5	39,2	1,0	52,5	0,87	11,5
O 181	81	0,4	17,4	64,6	18,1	0,7	28,0	0,91	11,0
O 186	85	0,0	0,0	16,1	83,5	0,3	76,3	0,97	5,5
O 187	86	0,0	5,0	20,1	74,7	0,8	72,2	0,94	6,5
O 192	93	0,0	9,4	67,1	23,4	1,0	46,0	0,72	13,0
O 194	89	0,0	2,0	21,3	76,5	0,3	71,2	0,93	6,0
O 195	90	0,0	0,6	27,7	72,5	0,4	78,3	0,80	6,5
O 196	86	0,0	8,8	63,0	28,0	0,3	33,3	0,98	8,5

Les particules calcaires sont, pour la plus grande partie, des débris de Bryozoaires Cellaria — en bâtonnets — ou de Crisiidae — à forme encroûtante —, des coquilles de Mollusques et des plaques de Balanes. La partie non calcaire est siliceuse.

Le tableau 1 indique pour ces échantillons la teneur en calcaire de la partie inférieure à 5 mm qui a été seule étudiée. La variabilité du rapport $MgCO_3$/carbonates, qui pourrait être un indice de différences de variété cristalline, est assez faible (3 à 5 p. 100 pour vingt-six échantillons).

La granulométrie, très variable (tabl. 1), a été obtenue à l'aide d'une série de tamis de 10 cm de diamètre, sur les échantillons-doses mis en essai (50 g environ). On a pu constater que les particules en bâtonnets passaient à travers les mailles carrées des tamis un peu supérieures à leur diamètre. Les granulométries ainsi obtenues sont proches de celles effectuées par le CNEXO. Il n'y a quasiment pas de particules inférieures à 0,160 mm. D'après quelques échantillons, dont ceux les moins riches en calcaire, la teneur en calcaire est plus faible dans les fractions les plus fines (tabl. 2).

TABLEAU 2

Teneurs en calcaire de différentes fractions granulométriques de quelques échantillons (* fractions 1-0,5 mm)

Calcareous contents of various particule-size fractions of some limestones samples

N° Echantillon	Fraction (mm)				
	2,500-1,250	1,000-0,630	0,500-0,315	0,315-0,200	< 0,200
A 152	93 p. 100	84	77	71	—
F 118	92	89	77	72	—
F 128	92	86	86	80	83
G 9	91	91	83	80	59
G 216	—	—	78	54	38
G 210	88	73 *	59	—	—
G 212	80	77 *	65	—	—
O 181.....	97	88 *	65	—	—

La densité apparente des échantillons remaniés au laboratoire a été mesurée pour disposer d'une grandeur qui puisse être liée aux proportions des divers types de particules. Cette grandeur conventionnelle dépend aussi des caractéristiques de la granulométrie et de la densité de chaque particule.

L'épaisseur des particules de plusieurs fractions granulométriques d'échantillons paraissant constitués surtout de particules plates a été estimée en dénombrant les particules de sous échantillons pesés et en les assimilant à des cylindres courts d'épaisseur h_0, de masse volumique 2,7 et de diamètre $2\bar{r}$, moyenne arithmétique des limites de fraction. On constate (tabl. 3) que les particules des fractions granulométriques fines ont une épaisseur proche du rayon moyen $\bar{r}$, ce qui signifie que la courbe de leur dissolution s'apparente à la courbe P′ de la figure 2.

La solubilité carbonique (pourcentage de calcaire dissous après 2 h d'agitation dans une solution saturée de gaz carbonique) a été mesurée sur la fraction brute 0-5 mm (tabl. 1). La corrélation entre les résultats de deux séries de mesures est de 0,91 ($r_{0,001} = 0,55$).

TABLEAU 3

Estimation de l'épaisseur de particules de différentes fractions granulométriques d'échantillons composés principalement de particules plates

Estimation of thickness of particules from various particule-size fractions of samples constituted chiefly of plate particules

Fraction mm	Rayon moyen mm	Echantillon		
		A 152	G 210	O 187
2,500-5,000	1,88	0,68 (136)	0,58 (60)	0,76 (310)
1,000-2,500	0,88	(1) 0,64 (324)	0,48 (210)	0,75 (400)
0,500-1,000	0,38	(2) 0,51 (510)	0,58 (140)	0,49 (600)
0,315-0,500	0,21	0,29 (620)	—	—

(1) Fraction 1,25-2,50 mm de rayon moyen 0,94.
(2) Fraction 0,63-1,00 mm de rayon moyen 0,41.
Entre parenthèses = nombre de particules comptées.
(1) Fraction 1,25-2,50 mm, mean ray 0,94 mm.
(2) Fraction 0,63-1,00 mm, mean ray 0,41 mm.
In a parenthesis : number of counted particules.

En case lysimétrique, le calcaire employé est du maërl, squelette calcifié de l'algue *Lithotamnium calcareum*, dont les particules sont plus ou moins ramifiées. La granulométrie est difficile à estimer. Nous avons admis que les particules pouvaient s'assimiler à des cylindres de poids distribué normalement par rapport à leur diamètre, et de telle façon que 10 p. 100 du poids soient inférieurs à 1 mm ou supérieurs à 10 mm. Il s'en déduit que le maërl employé pouvait être constitué au moment de l'apport de 33 p. 100 de particules comprises entre 0 et 4,3 mm, 33 p. 100 comprises entre 4,3 et 6,7 mm et 33 p. 100 comprises entre 6,7 et 11 mm. A ces fractions correspondent les rayons moyens de 1,08-2,75 et 4,42 mm.

4. — *Description des expériences*

a) *Essai en pots.*

L'équivalent de 40 g de $CaCO_3$ de chacun des trente-deux échantillons calcaires a été mélangé le 28/1/1976 à 10,3 kg de terre sèche contenant 85 p. 100 de terre fine, en provenance d'une lande acide, aux caractéristiques initiales suivantes :

carbone	2,1 p. 100	meq/100 g terre fine :	
perte au feu (550 °C)	5,4 p. 100	capacité totale d'échange (Metson)	11
argile (< 2 µ)	18 p. 100	calcium échangeable	1,1
limons (2 à 50 µ)	39 p. 100	magnésium échangeable	0,33
sables (50 µ à 2 mm)	43 p. 100	potassium échangeable	0,36
humidité équivalente	25 p. 100	sodium échangeable	0,14
P_2O_5 citrique	25 ppm	aluminium échangeable (Jackson)	3
		pH (terre/eau = 0,4)	4,8

La dose incorporée, 9,13 meq Ca/100 g de terre fine sèche à 105 °C, correspond à 5 400 kg CaO pour 2 500 t de terre sèche à l'ha.

Ces pots n'ont pas été cultivés. Ils ont été placés à l'extérieur sur des supports permettant de recueillir les eaux drainées, de connaître leur volume et leur teneur en calcium. Quinze jours environ avant chaque prélèvement de terre, les pots sont mis à l'abri des pluies. Entre avril et la mi-septembre 1976, ils ont été arrosés avec de l'eau permutée et sont ainsi restés le plus souvent à une humidité pondérale comprise entre 17 et 25 p. 100 de terre humide.

Nous avons procédé à des prélèvements de terre après 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 et 13 mois. Hormis les deux premiers prélèvements effectués avec une petite sonde, les pots ont été vidés puis remplis, après mélange de la terre et prélèvement.

Sur ceux-ci ont été mesurés : le pH (terre/eau = 0,4 ; agitation ; une heure d'attente ; agitation avant et pendant la mesure) ; dans certains cas, les Ca, Mg, K et Na échangeables extraits par une solution d'acétate d'ammonium molaire (2 h d'agitation).

Deux pots témoins non amendés ont été conduits dans les mêmes conditions, ainsi que des pots ayant reçu un même calcaire terrestre à différentes finesses (80 p. 100 inférieurs à 80 μ ou à 315 μ ou à 1 mm) à la même dose de 9,13 meq Ca/100 g de terre fine et à la dose moitié de 4,57.

Nous disposons par ailleurs de résultats d'essais, en pots, menés antérieurement depuis 1974, dans des conditions assez identiques (même terre). Ils ont reçus certains des échantillons calcaires testés aux doses de 9,13 et 4,57 meq Ca/100 g. Des observations portant sur le pH et le calcium échangeable ont également été effectuées à différentes dates.

b) *Données obtenues en case lysimétrique.*

Il s'agit de la case lysimétrique N° IV du dispositif de Quimper, contenant, depuis 1954, une terre acide amendée avec l'équivalent de 15 t CaO par ha sous forme de maërl brut à 90 p. 100 de calcaire.

Les principales caractéristiques de la terre à cette date sont les suivantes :

terre fine	75 p. 100
argile	18 p. 100
limons	29 p. 100
sables	38 p. 100
perte au feu	13,4 p. 100
calcium éch.	1,8 meq/100 g
pH eau	4,9

Elle a été constamment cultivée (céréales, maïs, ray-grass, betteraves, pommes de terre). Il n'y a pas eu d'engrais azotés jusqu'en 1966. Le travail du sol est assuré par bêchage à 25 cm de profondeur (profondeur travaillée et longueur du fer de bêche).

La quantité de calcium apportée à cette couche sous forme calcaire, peut être évaluée à 22,3 meq par 100 g de terre fine. En supposant que le calcium retenu dans le sous-sol l'ait été progressivement au cours du temps, les pertes totales moyennes annuelles de la couche 0-25 cm (469 kg) ont été, suivant les périodes, de 0,61 et 0,68 meq Ca/100 g de terre fine de la couche 0-25 cm (tabl. 4*a* et 4*b*).

Le pH et le calcium échangeable ont été mesurés à plusieurs reprises.

TABLEAU 4*a*

Bilan du calcium dans la case lysimétrique N° IV de Quimper.
Les termes du bilan sont à rapprocher de la quantité de calcium apportée à la case (3 473 g CaO, dont 2 923 sous forme de maërl et 550 sous forme de scories) et au fait qu'en 1976 sont encore observées des particules de maërl

Balance-sheet of calcium in Quimper lysimeter N° IV.
Elements of balance-sheet are to compare with added quantity of calcium into lysimeter (3 473 g CaO, 2 923 g of which by maërl and 550 by scories) and with the fact that, in 1976, maërl particules are still observed

Quantités de calcium (g CaO)	1954-1976	1954-1965		1965-1976	
		totale	moyenne annuelle	totale	moyenne annuelle
Retenue sous forme échangeable dans 0-80 cm	(1 601)				
Retenue sous forme échangeable dans 0-25 cm	1 219				
Retenue sous forme échangeable sous 0-25 cm	382		17,4		17,4
Drainée sous 0-80 cm	1 262	677	56,4	585	58,5
Exportée par les cultures	202	72	6,0	130	13,0
Totale perdue par 0-25 cm			79,8		88,9
Totale perdue annuellement par la couche 0-25 cm (meq Ca/100 g terre fine)			0,61		0,68
Totale retenue sous forme échangeable, drainée ou exportée	**3 065**				

TABLEAU 4*b*

Variations du calcium échangeable dans les différents hozizons de la case lysimétrique N° IV de Quimper
Exchangeable calcium variations into the various layers of Quimper lysimeter N° IV

Horizons	0-20 cm	20-45 cm	45-65 cm	65-80 cm	Total
CaO p. 1 000 éch. en 1976	3,1	1,54	0,385	0,322	
CaO p. 1 000 éch. en 1954	0,5	0,40 (1)	0,250 (2)	0,180 (3)	
Variation CaO p. 1 000 éch.	2,6	1,14	0,135	0,142	
Kg terre fine (4)	375	469	375	281	
G. CaO éch.	975	535	51	40	(1 601)

(1) Horizon 20-40 cm ; (2) horizon 40-60 cm ;
(3) horizon 60-80 cm ; (4) la densité apparente est estimée à 1,25.

Résultats et discussion

En fonction de l'analyse de la figure 1, nous pouvons émettre l'hypothèse que les différences d'augmentation du pH à une même date, observées en pots, résultent de différences de dissolution des particules calcaires liées aux facteurs de surface et de dureté des particules.

En effet, l'interaction possible du nombre de particules sur l'incidence du calcium dissous sur le pH, est vraisemblablement faible car les mélanges ont été fréquents, au moins après le troisième mois. Il en est sans doute de même pour la case lysimétrique, travaillée une à deux fois par an, ce qui, en regard de la grosseur des particules apportées, peut être considéré comme fréquent.

La relation (4) dégagée ci-dessus est donc testée à l'aide des résultats de ces deux expériences.

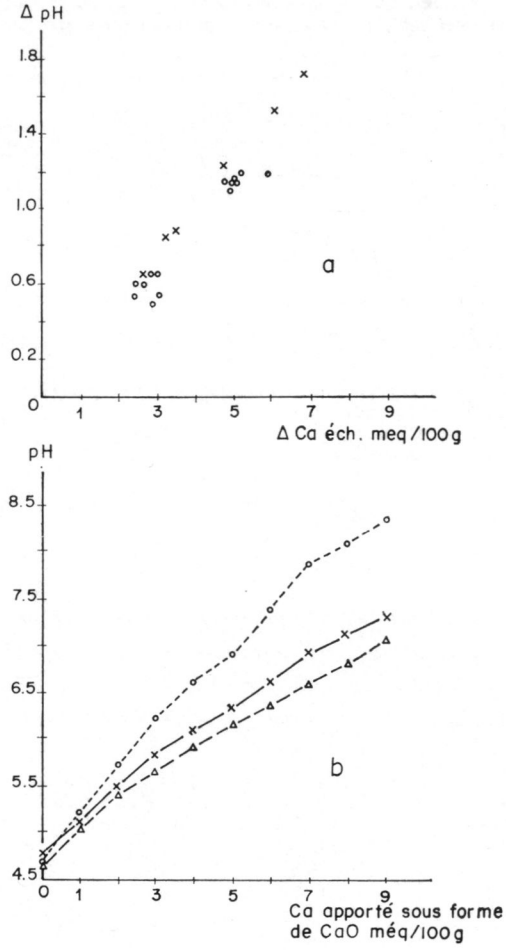


FIG. 3*a*. — *Augmentations du pH et du calcium échangeable après apports de calcaire.*

o pots 1974 ;
× pots 1976 ayant reçu des calcaires terrestres.

Augmentations of pH and exchangeable calcium after additions of limestone.

FIG. 3*b*. — *Augmentations du pH après apports de calcium sous forme CaO.*

o - - - - - - - - mesure après 2 h,
× ———— mesure après 19 h,
Δ — — — — mesure après 26 h (après 42 h la courbe reste confondue avec celle-ci).

Augmentations of pH after additions of calcium with CaO.

1. — *Essai en pots*

La régression du pH avec le calcium échangeable de la terre des pots mis en essai en 1974 et des pots ayant reçu des calcaires terrestres en 1976, observés au 30-11-76, soit 29 et 10 mois après l'apport, est approximativement linéaire (fig. 3*a*). Le coefficient angulaire β est égal, en imposant à la régression de passer par (0,0), à 0,244 unité pH/meq Ca/100 g. A ces dates ces calcaires sont entièrement dissous car on n'observe pas ultérieurement d'augmentation du pH. D'ailleurs sur cette même terre, la régression observée entre le pH et la quantité de calcium, devenu sans doute échangeable, apporté sous forme de chaux indique un coefficient angulaire plus élevé, qui diminue avec le temps pour se stabiliser à 0,275 unité pH/meq Ca/100 g (fig. 3*b*).

Nous avons retenu pour β la valeur 0,24.

A l'aide de celle-ci, les quantités de calcium drainées sont transformées en unité pH soit βCa drainé. (Le tableau 5 indique seulement la valeur moyenne observée.)

TABLEAU 5

Valeurs moyennes de β Ca *drainé et de* Δ pH $+$ β Ca *drainé observées à la fin de différentes périodes, pour l'ensemble des traitements et pour les traitements témoins*

Mean values of observed β Ca *leached and observed* Δ pH $+$ β Ca *leached at various periods for all treatments and control*

Périodes	β Ca drainé traitements	β Ca drainé témoins	Δ pH $+$ β Ca drainé traitements
0-1 mois	0,000	0,000	0,31
0-2 mois	0,016	0,007	0,58
0-3 mois	0,020	0,009	0,74
0-4 mois	0,020	0,009	0,71
0-6 mois	0,020	0,009	0,84
0-8 mois	0,047	0,019	1,04
0-10 mois	0,157	0,064	1,25
0-13 mois	0,190	0,078	1,52

Pour chacune des périodes d'observation t-t_0, les augmentations du pH des différents traitements sont :

$$\Delta pH = pH - (pH + \beta Ca \text{ drainé})_{\text{témoin}} .$$

En se référant ainsi à un traitement témoin on élimine vraisemblablement les variations « saisonnières » du pH. Les données du tableau 6 ne montrent pas en effet de forte liaison entre l'amplitude de ces variations et le pH moyen de la terre. En tenant compte du drainage en calcium du témoin, on corrige sa diminution propre du pH.

On peut alors en déduire les valeurs observées (tabl. 5) :

$$(\Delta pH + \beta Ca \text{ drainé})_{\text{obs.}} = (pH + \beta Ca \text{ drainé}) - (pH + \beta Ca \text{ drainé})_{\text{témoin}} .$$

Ces valeurs observées vont être comparées aux valeurs calculées selon (4). En effet, compte tenu des caractéristiques des calcaires expérimentés et des remarques concernant la dissolution des différentes formes de particules, nous assimilons les

TABLEAU 6

Valeur moyenne et coefficient de variation du pH *d'échantillons de terre prélevés à différentes dates dans les mêmes parcelles.*

Les parcelles 1, 2 *et* 3 *ont été observées entre* 1960 *et* 1966. *Les parcelles* 4, 5 *et* 6 *l'ont été en* 1977
Mean values and coefficient of variation of pH *in samples of soil from the same field at various dates*

Parcelles	1	2	3	4	5	6
pH moyen	5,20	6,08	6,45	5,88	5,95	6,80
c v (p. 100)	5,17	4,37	4,28	3,68	2,50	2,56
Nombres de mesures	54	65	65	55	54	54

particules à des cylindres allongés. La relation (4) s'écrit dans le cas de quatre fractions granulométriques et en absence d'exportation de calcium par les cultures :

$$\Delta pH + \beta Ca\ dr. = \frac{0{,}4\,\beta Q_0}{100}\left[100\text{-}a_1\text{-}a_2\text{-}a_3\text{-}a_4 + \frac{2\,kt}{\rho}\left(\frac{a_1}{r_{01}} + \frac{a_2}{r_{02}} + \frac{a_3}{r_{03}} + \frac{a_4}{r_{04}}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{k^2 t^2}{\rho^2}\left(\frac{a_1}{r_{01}^2} + \frac{a_2}{r_{02}^2} + \frac{a_3}{r_{03}^2} + \frac{a_4}{r_{04}^2}\right)\right]$$

avec $a_i = 0$ si $t \geqslant \frac{r_{0i}\,\rho}{k}$, a_1, a_2, a_3, a_4, étant respectivement les pourcentages, dans la quantité de calcaire apportée, des fractions granulométriques comprises entre 0,160 et 0,315 mm ; 0,315 et 0,5 mm ; 0,5 et 1 ; 1 et 5 mm. Ces dernières ont pour rayon moyen respectif 0,119-0,204-0,375 et 1,5 mm. On néglige le fait que les fractions les plus fines sont un peu moins riches en calcaires. Les autres valeurs numériques sont :

$\beta = 0{,}24$ unité pH/meq Ca/100 g ; $0{,}4\ Q_0 = 9{,}13$ meq Ca/100 g ;
$\rho = 2{,}7$; t est exprimé en mois et k en mg de calcaire par mm² et par mois.

Si la relation ci-dessous est vraie, on doit au moins constater que, pour des périodes données, la régression :

$$(\Delta pH + \beta Ca\ dr.)_{obs.} = b(\Delta pH + \beta Ca\ dr.)_{calc.} + c$$

est telle que b et c ne sont pas significativement différents de 1 et 0.

N'ayant pas d'information sur les différences éventuelles de k (vitesse de dissolution par unité de surface estimée par la granulométrie) des trente-deux échantillons calcaires, nous donnons à k la valeur moyenne, correspondant, pour une période donnée, au point moyen tel que :

$$\sum_{1}^{32}(\Delta pH + \beta Ca\ dr.)_{obs.} = \frac{0.4\,\beta Q_0}{32 \times 100} \times$$
$$\times \left[32 \times 100 - \sum_{1}^{32}\sum a_i + \frac{2\,kt}{\rho}\sum_{1}^{32}\sum \frac{a_i}{r_{0i}} - \frac{k^2 t^2}{\rho^2}\sum_{1}^{32}\sum \frac{a_i}{r_{0i}^2}\right]$$

avec $a_i = 0$ si $t \geqslant \frac{r_{0i}\,\rho}{k}$.

C'est une équation du second degré en k, dont on retient la racine la plus petite. En effet, la fonction de k, $\Delta pH + \beta Ca$ drainé, n'a de sens ici que dans la région où elle est croissante, si toutefois Ca drainé est inférieur à ΔpH. Or elle passe par un maximum. Elle n'a de sens de plus que si k est inférieur à $\frac{r_{01}\,\rho}{t}$ mais supérieur à $\frac{r_0\,\rho}{t}$, r_0 étant le rayon d'une fraction entièrement dissoute à t.

Pour la première période 0-1 mois, k est calculé dans le cas où la fraction la plus fine, de rayon moyen 0,119 mm, n'est pas encore entièrement dissoute, et dans le cas où elle est dissoute. On rejette cette dernière éventualité puisque la valeur obtenue 0,049 indique que la fraction de rayon 0,119 mm n'est dissoute qu'à

$$t = \frac{0{,}119 \times 2{,}7}{0{,}049} = 6{,}5 \text{ mois}.$$

En prenant donc en compte cette fraction plus fine, on obtient k = 0,076 mg de calcaire/mm²/mois (la deuxième racine est égale à 1,17). La date à laquelle elle devrait être totalement dissoute est $\frac{0{,}119 \times 2{,}7}{0{,}076} = 4{,}2$ mois. Le tableau 7 montre la participation respective de chacune des fractions à la quantité de calcaire dissoute de la somme des échantillons.

TABLEAU 7

Participation de chaque fraction granulométrique à la quantité de calcaire dissoute aux différentes dates d'observation sur l'ensemble des échantillons

Participation of every particule-size fraction into the quantity of dissolved limestone at various dates for all the samples

t (mois)		1	2	3	4	6	8	10	13
K		0,076	0,076	0,068	0,049	0,040	0,040	0,042	0,050
p. 100 théorique de calcaire dissous dans chaque fraction granulométrique : soit $P = \left[1 - \left(1 - \frac{kt}{r_{0i}\,\rho}\right)^2\right] \times 100$	r_{0i} 0,119	41,7	72,6	86,7	84,8	93,6	100	100	100
	0,204	25,7	47,8	60,4	58,5	68,2	82,4	94,4	100
	0,375	14,4	27,9	36,2	35,0	41,8	53,2	65,8	87,2
	1,500	3,7	7,4	9,8	9,4	11,5	15,2	19,7	29,5
p. 100 théorique de calcaire dissous issu de chacune des fractions rapporté à l'ensemble des échantillons dont elles constituent a_i p. 100 (soit $a_i P$)	a_i 6,6 p. 100	2,8	4,8	5,7	5,6	6,2	6,6	6,6	6,6
	16,7 p. 100	4,3	8,0	10,1	9,8	11,4	13,8	15,8	16,7
	40,3 p. 100	5,8	11 3	14,6	14,1	16,8	21,4	26,5	35,1
	36,2 p. 100	1,3	2,7	3,6	3,4	4,2	5,5	7,1	10,7
p. 100 théorique de calcaire dissous issu de toutes les fractions rapporté à l'ensemble des échantillons (soit 100 c)		14,2	26,8	34,0	32,9	38,6	47,3	56,0	69,1
$C \times 0{,}4\beta\, Q_0 \times n = \sum_{1}^{32} (\Delta pH + \beta\, Ca \text{ drainé})_{obs.}$ n = 32 échantillons ou 31 (période 0-10 mois)		9,95	18,65	23,77	22,83	26,88	33,15	38,70	48,75

Pour chacun des échantillons et pour cette période 0-1 mois, on calcule avec k = 0,076, suivant la relation (4) les valeurs ($\Delta pH + \beta Ca$ dr.) calculées. On constate une corrélation positive très hautement significative entre ces valeurs calculées et les

valeurs observées ($r = 0,90$, et la probabilité d'observer $|r| > 0,55$ en raison du hasard est inférieure à 0,001), et l'on observe que les variances des valeurs observées et des valeurs calculées ne sont pas significativement différentes (tabl. 8 et fig. 4*a*).

TABLEAU 8

Essai en pot : comparaison des valeurs observées et des valeurs calculées des augmentations du pH *aux différentes périodes d'observation*

Pot experiment : observed values compared with calculated values of augmentations of pH *at various dates*

Périodes (mois)	0-1	0-2	0-3	0-4	0-6	0-8	0-10	0-13
K (mg $CaCO_3$/mm²/mois)	0,076	0,076	0,068	0,049	0,040	0,040	0,042	0,051
Coefficient de corrélation entre valeurs observées et valeurs calculées (1) . . .	0,90	0,94	0,93	0,93	0,94	0,90	(0,81)	(0,76)
Rapport des variances des valeurs calculées et des valeurs observées (2) . . .	1,12	1,03	1,06	1,10	1,30	1,24	1,61	2,14
Coefficient de corrélation entre la densité apparente et les écarts (valeurs obs.-valeurs calculées) (1)	— 0,43	— 0,63	— 0,78	— 0,82	— 0,79	— 0,79	— 0,61	— 0,52

(1) Significatif au seuil 0,001 si supérieur à 0,55 et au seuil 0,01 si supérieur à 0,44. Pour les périodes 0-10 et 0-13 mois, les variables, valeurs calculées et valeurs observées, s'écartent de la normalité, aussi le coefficient de corrélation indiqué est le coefficient de Spearman, significatif ici au seuil 0,01 car supérieur à 0,43.
(2) Ce rapport est significativement (0,05) différent de 1 s'il est supérieur à 1,84.

On procède de façon similaire pour les périodes suivantes. On observe que k diminue, portant à 8 mois la date à laquelle la première fraction est totalement dissoute. Pour la période 0-10 mois, seules alors sont prises en compte les trois fractions restantes. A la période 0-13 mois, la valeur calculée avec ces trois fractions indique que la deuxième fraction est dissoute au douzième mois, on néglige donc les deux premières fractions.

On obtient, pour ces différentes périodes, des régressions répondant aux exigences formulées (tabl. 8 et fig. 4*b* et 4*c*).

On observe une corrélation négative très hautement significative ($r = — 0,80$, pour plusieurs périodes, alors qu'au seuil 0,001, $|r| = 0,55$) entre les écarts des valeurs calculées aux valeurs observées et la densité apparente des échantillons remaniés (fig. 4*d*). Il est possible qu'aux faibles densités correspondent des échantillons riches en particules de bryozoaires et que la surface de ce type de particule, à structure cellulaire, soit sous-estimée lorsque ne sont considérées que leurs dimensions granulométriques. Mais des différences de forme de particules et de variétés cristallines pourraient aussi intervenir. On peut d'ailleurs calculer k pour chaque échantillon à partir de (4), de ses caractéristiques granulométriques et des valeurs observées de $\Delta pH + \beta Ca$ drainé à 8 mois, par exemple. Dans le tableau 9, k est ainsi estimé en comparant les valeurs observées à 8 mois à celles calculées pour différents k arbitraires. En se basant

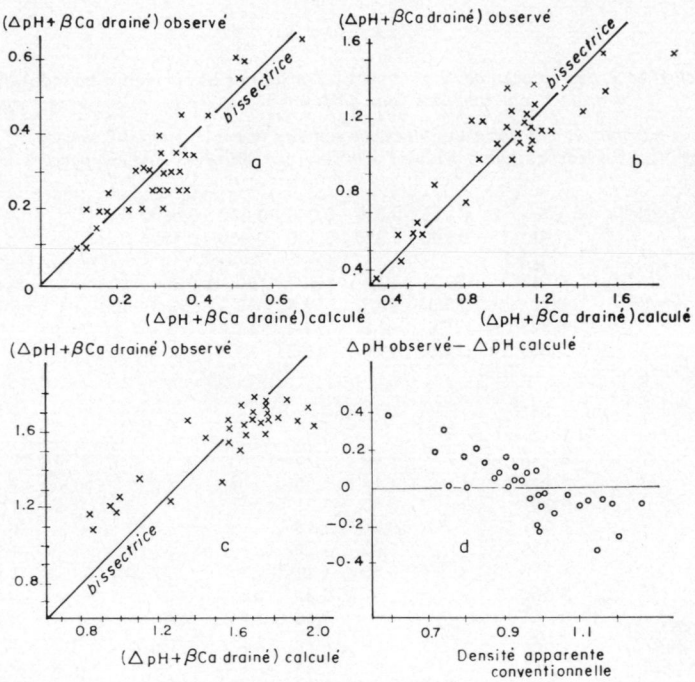


FIG. 4. — *Régression des valeurs observées et des valeurs calculées selon* (4) *de* (Δ pH + βCa *drainé*),

1 mois (fig. 4*a*), 8 mois (fig. 4*b*) ou 13 mois (fig. 4*c*) après apport des différents échantillons calcaires.

— Etude des écarts des valeurs observées aux valeurs calculées et de la densité apparente des échantillons calcaires — période 0-8 mois — (fig. 4*d*).

Regression of observed values and calculated values according to (4) *of* (Δ pH + βCa *leached*),

1 month (fig. 4*a*), 8 months (fig. 4*b*) and 13 months (fig. 4*c*), after addition of limestone samples.

— Study of digressions « observed values — calculated values » and conventional apparent density of limestone samples — period 0-8 months — (fig. 4*d*).

sur les valeurs extrêmes on constate que k est moins variable, pour la gamme des échantillons calcaires étudiée, que la surface initiale des particules estimée par la granulométrie (les particules étant assimilées à des cylindres longs) :

	k	surface initiale pour 100 g
	—	—
minima	0,025	526 cm^2
maxima	0,070	4 607 cm^2
max./min.	2,8	8,8

La diminution de k à partir du 4e mois, son augmentation à partir du 10e puis du 13e mois, sont à rapprocher des conditions de milieu. En effet, au 4e mois les pots n'ont reçu ni pluie ni eau d'arrosage, les mois suivants la température a été élevée. Or la solubilité de la calcite diminuerait quand la pression partielle en CO_2 diminue, ce qui aurait lieu en période sèche (Russel, 1915, cité par Crahet, 1967). Elle diminuerait aussi, à pression partielle en CO_2 constante, lorsque la température augmente (Stchouz-

TABLEAU 9

Estimation de K pour chacun des échantillons calcaires mis en pot, sur la période 0-8 mois : les valeurs (Δ pH + β Ca drainé) sont calculées pour différents K arbitraires et comparées aux valeurs observées

Estimation of K for every limestone samples in pot, current 0-8 months : the values (Δ pH + β Ca leached) are calculated with several arbitrary K and compared with observed values.

$100 - 100\left(1 - \frac{Kt}{r_{0i}\,\rho}\right)^2$	K Kt r_{0i}	0,025 0,200	0,030 0,240	0,040 0,320	0,050 0,400	0,060 0,480	0,070 0,560	ΔpH + βCa dr. observé à 8 mois	Surface initiale cm²/100 g
	0,119	85,7	93,6	100	100	100	100		
	0,204	59,4	68,2	82,4	92,5	98,3	100		
	0,375	35,6	41,8	53,2	63,4	72,3	80,0		
	1,500	9,6	11,5	15,2	18,8	22,3	25,7		
	N° Traitement								
	A 147		1,00	1,23				1,13	2 341
	A 150		1,12	1,36				1,33	2 689
	A 151		0,98	1,21				1,13	2 289
	A 152	0,83	0,96	1,19				0,92	2 215
	A 156		1,02	1,26				1,13	2 393
	A 157		0,89	1,11				1,08	2,037
	A 160			0,47	0,57			0,57	733
	A 161			0,66	0,79	0,90		0,82	1 096
	F 105			1,13	1,31			1,18	2 044
	F 109		1,30	1,54				1,54	3 296
	F 110			1,12	1,31			1,23	2 007
	F 111			1,19	1,36	1,51		1,38	2 259
	F 113			1,05	1,22	1,36		1,34	1 926
	F 118			1,13	1,33			1,28	2 000
ΔpH + βCa drainé calculé	F 122			1,05	1,22			1,13	1 941
	F 128			0,83	0,98	1,11	1,22	1,19	1 437
	G 8		0,68	0,81				0,72	1 711
	G 9	1,12	1,26	1,44				1,24	3 385
	G 19		1,33	1,56				1,34	3 430
	G 210		0,86	1,08				0,98	1 956
	G 212		0,93	1,14				1,03	2 185
	G 214		0,95	1,13				1,03	2 400
	G 216	1,50	1,68	1,91				1,54	4 607
	G 219		0,27	0,35				0,31	526
	O 180			0,90	1,06			0,98	1 541
	O 181		0,91	1,14				1,13	2 022
	O 186		0,36	0,47				0,41	733
	O 187			0,58	0,69			0,62	948
	O 192			1,04	1,22	1,38		1,22	1 785
	O 194			0,54	0,65			0,57	874
	O 195		0,45	0,58				0,57	926
	O 196			0,99	1,17			1,08	1 704

koy-Muxart, 1967, cité par F. Gras, 1974). On peut penser également que l'humidité du sol a limité directement les quantités de calcaire solubilisé.

Ces résultats montrent que les fractions les plus grossières ne sont pas encore entièrement dissoutes au 13e mois, ce qui est en accord avec les observations visuelles faites à cette date sur la terre.

Ils vérifient par contre *a posteriori*, que la plupart des calcaires des pots mis en essai en 1974 et utilisés pour l'estimation de β pouvaient être presque totalement

dissous à 29 mois $\left(r_0 = \frac{0{,}050 \times 29}{2{,}7} = 0{,}5 \text{ mm}\right)$. Il en est de même des pots contenant des calcaires terrestres très fins en 1976. Cette remarque pour les pots 1974 paraît d'autant plus fondée que les augmentations du pH ont été plus rapides que celles observées avec les mêmes calcaires en 1976.

Sur la période 0-13 mois, on remarque que les augmentations du pH les plus élevées sont inférieures à celles attendues par le calcul. Plusieurs raisons peuvent être invoquées. Il est possible que l'estimation de la surface des particules plates soit en cause, la figure 2 montrant qu'en fin de réaction la courbe P′ s'écarte notablement de la courbe C. Le coefficient k pourrait également intervenir : soit en raison d'une diminution du rapport surface apparente/surface vraie en fin de dissolution, soit en raison des modifications chimiques du milieu suite à l'augmentation du calcium dissous. L'estimation du coefficient β pourrait aussi être en cause.

2. — *Résultats en case lysimétrique*

La figure 5 montre la liaison existant entre le calcium échangeable et le pH sur la case lysimétrique en 1954, 1965, 1976. Cette liaison paraît confirmée par les valeurs observées en 1965 sur les autres cases contenant la même terre au départ mais ayant été traitées différemment. Le coefficient β est égal à 0,140.

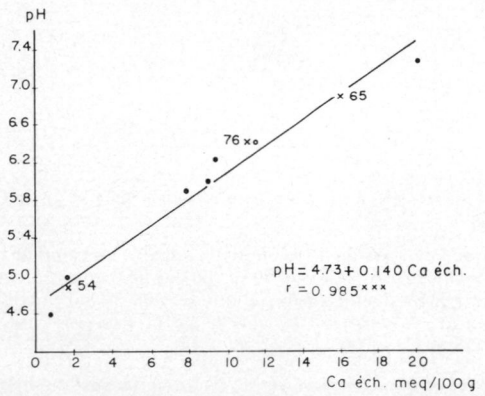


FIG. 5. — *pH et calcium échangeable du sol des cases lysimétriques de Quimper.* (× case n° IV en 1954, 1965, 1976 ; ● autres cases en 1965).

pH and exchangeable calcium of soil of Quimper lysimeters.

La relation (4) peut s'écrire ici, en assimilant les particules de maërl à des cylindres allongés :

$$pH = pH_0 + \frac{0{,}4\,\beta Q_0}{100}\left[100\text{-}a_1\text{-}a_2\text{-}a_3 + \frac{2\,kt}{\rho}\left(\frac{a_1}{r_{01}} + \frac{a_2}{r_{02}} + \frac{a_3}{r_{03}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{k^2 t^2}{\rho^2}\left(\frac{a_1}{r_{01}^2} + \frac{a_2}{r_{02}^2} + \frac{a_3}{r_{03}^2}\right)\right] - \beta\text{Ca drainé et exporté/mois} \times t$$

avec :

$pH_0 = 4,9$; $\beta = 0,140$; $0,4\ Q_0 = 22,3$ meq Ca/100 g de terre ;
$a_1 = a_2 = a_3 = 33$ mais $a_i = 0$ si $t \geqslant r_{0i}\,\rho/k$;
$\rho = 2,7$; $r_{01} = 1,08$ mm ; $r_{02} = 2,75$ mm ; $r_{03} = 4,42$ mm.

Ca drainé et exporté = 0,61 meq Ca/100 g/an de 1954 à 1965 et 0,68 de 1966 à 1976.

Sur la figure 6 est tracée la courbe correspondant à k = 0,05 (valeur moyenne sur 13 mois trouvée précédemment en pots) et une granulométrie telle que 90 p. 100 des particules soient comprises entre 1 et 10 mm. Elle s'accorde bien à la courbe expérimentale. Nous ne pensons pas qu'il convienne pour autant d'en déduire que les facteurs agissant sur la dissolution soient comparables dans leur intensité en pots et dans la case lysimétrique, compte tenu des différences de conditions.

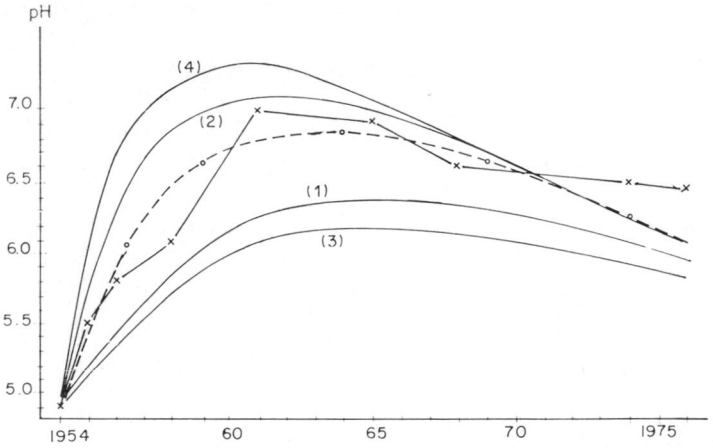


FIG. 6. — *Variations expérimentales du pH dans la case lysimétrique n° IV de Quimper au cours des vingt-deux dernières années* (× —— ×).

Courbes calculées avec la vitesse de dissolution du calcaire déterminée en essai en pots (k = 0,05) et une granulométrie du calcaire telle que 90 p. 100 des particules soient compris entre 1 et 10 mm (o - - - o) ou avec cette même granulométrie et k = 0,03 (1) ou k = 0,07 (2). Courbes calculées avec k = 0,05 et une granulométrie telle que 90 p. 100 des particules soient compris entre 2 et 20 mm (3) ou entre 0,5 et 5 mm (4).

Experimental variations of pH of Quimper lysimeter n° IV during the last twenty-two years (× —— ×).

Calculated curves with determinated dissolution velocity of limestone in pot experiment (k = 0,05) and particule — size distribution of limestone so that 90 p. 100 of particules are included between 1 and 10 mm (o - - - o) or with this same particule — size distribution and k = 0,03 (1) or k = 0,07 (2). Calculated curves with k = 0,05 and particules — size distribution so that 90 p. 100 of particules are included between 2 et 20 mm (3) or between 0,5 and 5 mm (4).

Conclusion

Une approche cinétique quantitative de la dissolution des particules d'amendements calcaires rend bien compte des variations du pH consécutives à leur emploi en pots et en case lysimétrique. De ce fait, la granulométrie des amendements apparaît comme un paramètre important.

L'approche précédente doit donc aider aux choix des doses, des types de calcaires, des espacements entre apports. Dans ce but une étude plus approfondie des caractéristiques des courbes de variations du pH lorsque varient les différents paramètres, par des méthodes de calculs automatisés, serait utile. Sous cet aspect, un fait intéressant à souligner se dégage d'emblée : les particules plates libèrent vraisemblablement le calcium avec une vitesse constante au cours du temps, d'où leur intérêt pour les chaulages d'entretien visant à compenser régulièrement les pertes par drainage. C'est d'ailleurs à ce type de particules que s'assimilent les coquilles de Mollusques constituant les « trez » grossiers, les coquilles d'huître et de moules souvent employées en Bretagne.

Cette approche requiert la connaissance de la granulométrie du calcaire et sa vitesse de dissolution. En première approximation on peut évaluer celle-ci par la vitesse moyenne observée en essai avec les calcaires étudiés ($k = 0{,}05$). Pour un calcaire donné, il semble possible de préciser facilement sa vitesse de dissolution par rapport à cette vitesse moyenne. En effet, la relation (2) se vérifie lorsque la dissolution a lieu en solution carbonique. Nous en développerons par ailleurs les résultats détaillés. Nous avons, sur ce point, constaté que Bondorff (1974), par une approche un peu similaire, obtient en solution d'acétate de sodium, des résultats dans le même sens ; il s'agit toutefois de fractions granulométriques isolées. Il en résulte que, connaissant la solubilité carbonique et la granulométrie d'un calcaire, on pourrait en déduire sa vitesse de dissolution en solution carbonique k_{sc}. Il reste à passer aux conditions naturelles. A cet égard, la constatation expérimentale (conditions des pots et des calcaires étudiés) de la constance du rapport k/k_{sc} indique une voie possible. Il s'agirait de déterminer les principales variables intervenant sur ce rapport, par exemple : humidité, régime hydrique, état chimique du sol.

Enfin, pour améliorer un tel mode de prévision des effets des amendements calcaires, il conviendrait de mieux connaître et hiérarchiser l'importance des autres composants, bien évidemment variables selon les modalités de culture, telles que l'efficacité du calcium dissous sur le pH (coefficient β), l'impact éventuel de l'agrégation de particules fines entre elles, l'effet du pH sur la quantité de calcium drainé.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Remerciements

Nous remercions Messieurs M. Coppenet (Directeur de la Station d'Agronomie de Quimper), J. P. André, J. C. Arvieu, R. Gras (Station d'Agronomie et de Physiologie Végétale, Antibes), C. Juste (Station d'Agronomie, Bordeaux) et A. B. Delmas (Station de Science du Sol, Versailles) qui ont apporté leurs conseils à ce travail.

Nous remercions aussi le Centre National pour l'Exploitation des Océans qui a financé l'étude des échantillons calcaires expérimentés ici, en vue de leur emploi comme amendements calcaires.

Summary

Law ruling pH variations in an acid soil after a supply of limestone particles with different characteristics

The pH variations in an acid soil submitted to a calcareous manure are connected with calcium balance, its action on the pH and with the kinetics of decomposition of the calcareous particles. The latter is supposed to depend only on the particle surface.

The relation is compared with the results obtained by tests in pots and lysimeters which have received different biodetrital sea limestones the particles of which have been classed as long cylinders. The observed increases on the pH fit in well the calculated values :

$$pH = E\,[Ca_0 + Ca_1 - Ca_1 \Sigma\, a_i/100\,(1 - kt/r_{0i}\,\rho)^2 - Ca_2\,t] - pH_0$$

with $a_i = 0$ if $t > r_{0i}\,\rho/k$
in which pH_0 and Ca_0 correspond to the pH and the exchangeable calcium of the soil at time $t = 0$ when the amount of calcium Ca_1 is ploughed in ; Ca_2 is the amount of calcium exported and drained by time unit, a_i and r_{0i} are the percentage and the mean radius (mm) of the granulometric fractions of Ca_1, ρ is the voluminal mass of the limestone, k is a rate of decomposition of limestone by calcareous surface unit ($mg/mm^2/month$) ; E is the experimental expression linking the soil pH with the exchangeable calcium, it is approximately linear in the studied cases and scales.

This approach may allow a better arguing of the choice of the doses and characteristics of calcareous manure to employ so as to rectify the pH of an acid and to maintain it at a given level. It is noted for example that flat particles which probably release calcium at a constant rate in time are the most fitted to regularly make up for calcium losses.

Zusammenfassung

Gesetz uber die pH-Schwankungen in einem Sauerboden nach Zufuhr von Kalkteilchen mit Verschiedenen Merkmalen

Nach einer Analyse der verschiedenen Faktoren, die fähig sind, einen Einfluss auf die pH-Schwankungen eines Sauerbodens auszuüven, dem eine Kaldküngung aus Meeresabfällen zugefürt wurde, wird diese pH-Schwankung des Bodens mit der Kalziumbilanz, deren Auswirkuhg auf den pH und mit der Zersetzungskinetik der Kalkteilchen in Verbindung gebracht. Von der letzteren nimmt man an, dass sie nur von der Teilchenfläche abhängig ist.

Die errechneten Zunahmen des pH stimmen mit den in Topfvorrichtung und lysimertrischen Zellen beobachteten Zunahmen überein.

Die vorgeschlagene Annäherung kann dazu verhelfen, die Wahl der Dosen, der Zufuhrfrequenz und der Merkmale der Kalkdüngung zu verbessern. Es wird z. B. festgestellt dass die flachen Teilchen, die wahrscheinlich Kalzium mit einer konstaten Geschwindigkeit im Laufe der Zeit befreien, am besten dazu befähigt sind, die Kalziumverluste auszugleichen.

РЕЗЮМЕ

Закономерность изменений pH кислой почвы по внесении известковых частичек с разными характерностями.

БЮССИЕР Ф.

Прежде всего анализировались факторы, способные повлиять на изменения pH кислой почвы, получившей биодетритические известковые удобрения морского происхождения. Затем эти изменения связывались с балансом кальция, с его действием на pH, и с кинетикой растворения известковых частичек. Предполагается что кинетика эта зависит исключительно от площади частичек.

Вычисленные увеличения pH соответствовали увеличениям наблюдавшимся в опытах в вегетационных вазах и в лизиметрах.

Такой подход к вопросу может помочь лучмему выбору доз, частоты внесений и охарактеризованию известковых удобрений.

Отмечено было, например, что частички плоской формы, освобождающие кальций по всей вероятности с постоянной скоростью во времени, наиболее подходящи для компенсации кальчиевых потерь.

Références bibliographiques

ANDRÉ J. P., 1976. Les propriétés d'échangeur cationique de la Tourbe de Sphaignes : échanges bicationiques entre proton et un cation métallique. *Ann. agron.*, **27** (1), 17-31.

BEAR F. E., ALLENN L., 1932. Relation between fineness of limestones particules and their rates of solution. *Industrial and Engineering Chemistry*, **24** (9), 998-1001.

BOISCHOT P., HÉBERT J., 1947. Sur le dosage du calcaire actif des sols par la méthode de l'oxalate

d'ammonium et son application au dosage du calcaire facilement assimilable des amendements. *Ann. agron.*, 522-529.
BONDORFF K. Ai, 1974. Dissolution velocity of lime varieties. *Tidsskr. Planteavl*, **78** (3), 347-352.
BRIOUX Ch., JOUIS Ed., 1930. Corrélation entre la solubilité carbonique des calcaires broyés et leur action neutralisante sur les sols acides. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 453-461.
CHAMINADE R., 1933. Mode d'action de la chaux sur les sols et correction de leur acidité. *Ann. Sc. agron.*, 453-477.
COPPENET M., 1957. Le problème du chaulage à la lumière de la science agronomique moderne. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol*, 1020-1044.
COPPENET M., 1964. *Compte rendu annuel des travaux effectués à la Station d'Agronomie de Quimper.*
COPPENET M., 1969. Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965). *Ann. agron.*, **20** (2), 111-143.
CRAHET M., 1967. Le pH des sols calcaires. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol*, 4, 17-34.
DAGNÉLIE P., 1973. *Théorie et Méthodes Statistiques. Applications Agronomiques.* Presses agronomiques de Gembloux, Belgique.
DEMOLON A., 1932. *La dynamique du sol.* Ed. Dunod, Paris.
DROUINEAU G., 1942. Dosage rapide du calcaire actif des sols. *Ann. agron.*, 441-450.
GRAS F., 1974. Application d'une méthode expérimentale à la détermination du pH et à la solubilité du carbonate de calcium dans les sols calcaires. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol*, 1, 33-48.
HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural.* Ed. Masson, Paris.
LENGLEN, DURIER, 1930. Appréciation de la valeur des calcaires broyés employés en agriculture. *C. R. Acad. Agric. fr.*, 447-453.
LIWERANT J., 1953. Quelle finesse adopter pour les amendements calcaires ? *Ann. agron.*, 891-892.
MAUVISSEAU M. J., BARBIER G., 1950. A propos de la normalisation des amendements calcaires. *C. R. Acad. Agric. fr.*, 113-116.
MÉRIAUX S., 1961. Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. *C. R. Acad. Agric.*, 322-325.
MEYER T. A., VOLK G. W., 1952. Effect of particule size of limestones on soil reaction exchangeable cations and plant growth. *Soil Sci.*, **73** (1), 37-52.
MORGAN F., SALTER R., 1923. Solubility of limestones as related to their physical properties. *Soil Sci.*, **15**, 293-305.
SWARTZENDRUBER D., BARBER S. A., 1965. Dissolution of limestones particles in soil. *Soil Sci.*, **100** (4), 287-291.
THOMAS R. P., GROSS H. M., 1952. A method of estimating the reacting rate of different particle sizes of limestone. *Soil Sci.*, **73** (1), 53-59.

Annexe

Calcul du calcaire restant dans le cas de particules cylindriques allongées

On néglige les surfaces des sections cylindriques et l'on a :

$$s = 2\pi rh \qquad v = \pi r^2 h \qquad v_0 = \pi r_0^2 h$$

$$q = vp = \frac{Q}{n} \qquad q_0 = v_0 \rho = \frac{Q_0}{n}$$

si

$$dq = -k.s.dt$$

$$dq = -2k\pi rh = -2k.(\pi^{1/2} rh^{1/2}).(\pi^{1/2} r_0 h^{1/2}) . \frac{1}{r_0} . dt$$

$$dq = -2k.v^{1/2}.v_0^{1/2} . \frac{\rho^{1/2}.\rho^{1/2}}{r_0 \rho} . dt$$

$$dq = -\frac{2kq^{1/2} q_0^{1/2}}{r_0 \rho} . dt$$

$$dQ = n.dq = -\frac{2k.Q^{1/2}.Q_0^{1/2}}{r_0 \rho} . dt$$

qui a pour solution si, quand $t = 0$, $Q = Q_0$:

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{kt}{r_0 \rho}\right)^2 .$$

Ann. agron., 1978, **29** (6), 583-601.

Etude bibliographique

Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique

II. — Précision dans la caractérisation des unités de sols

J. P. LEGROS

Service d'étude des Sols,
Centre de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
9, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex

Résumé

Dans cette seconde partie de l'analyse bibliographique consacrée à la recherche et au contrôle de la précision en cartographie pédologique, on aborde :

— le calcul de la quantité d'informations nécessaires (nombre d'échantillons, nombre de profils, surface à prospecter). Ces méthodes sont séduisantes et utiles, cependant elles demeurent approximatives par manque de rigueur au plan statistique et parce qu'elles supposent connue la précision devant être considérée comme correcte ;

— la qualité des observations. Elle est en croissance continue, en particulier à cause de l'apparition des banques de données. Mais beaucoup de problèmes posés restent encore sans solution satisfaisante ;

— la précision des déterminations analytiques. Certes importante à considérer, elle est en général suffisante. La vraie question est la représentativité et la signification du résultat trouvé.

Certaines de ces méthodes sont faciles à mettre en œuvre. D'autres exigent des moyens informatiques, une banque de données pédologiques et une bonne connaissance de la statistique moderne. Globalement l'apport nous paraît suffisant pour que la cartographie (pédologique ou autre) puisse être dès maintenant, notablement repensée dans son principe et dans sa technique. On s'oriente vers une cartographie de plus en plus assistée par l'ordinateur.

Introduction

La précision dans la délimitation des sols a été abordée dans la première partie de cette étude bibliographique où étaient analysés successivement le choix des critères de cartographie et la précision au niveau du zonage (Legros, 1978). La caractérisation physico-chimique des unités cartographiques (quantité et qualité de l'information, précision des analyses) est envisagée dans la deuxième partie présentée ci-dessous.

I. — Quantité d'information nécessaire

Un certain nombre d'approches visent, en cartographie pédologique, à déterminer quel est le minimum d'information nécessaire qu'il s'agisse du nombre d'échantillons à analyser, du nombre de profils à creuser ou de la surface minimale qu'il convient de prospecter pour acquérir une connaissance suffisante du milieu. Ces efforts ont un intérêt évident : il s'agit d'économiser du temps et de l'argent tout en conservant à la cartographie le minimum requis de précision.

Toutes choses étant égales par ailleurs, il est évident que la précision sera d'autant meilleure que la quantité d'information disponible sera importante. Les progrès méthodologiques ne pourront intervenir qu'au plan qualitatif (voir plus loin) ou au niveau d'une meilleure exploitation des données.

a. — *Calcul du nombre d'échantillons nécessaires*

La méthode qui suit a été énormément employée entre 1945 et 1965 (Commonwealth Bureau of Soils, 1966 ; Dmitrieyev, 1966). Cela est lié au fait qu'elle constitue une bonne application de la statistique paramétrique. La démarche est la suivante :

Dans une unité pédologique, pour un horizon donné et une caractéristique déterminée, une dispersion s (= écart type = standard deviation) est calculée à partir des profils concernés. Si le nombre d'individus de l'échantillon est suffisant ou bien si l'on fait l'hypothèse de normalité pour la population, la fourchette sur la moyenne est de :

$$\pm \frac{s.t}{\sqrt{N}}$$

où t est la valeur ayant la probabilité P d'être dépassée, à lire suivant les cas dans la table de Student (petits échantillons) ou celle de la loi Normale (grands échantillons).

N est l'effectif (nombre de profils, nombre de prélèvements). Pour que l'incertitude sur la moyenne $\bar{x}$ soit inférieure à e (e = 5/100 par exemple), il faut donc :

$$\frac{s.t}{\sqrt{N}} \cdot \frac{1}{\bar{x}} < \text{e p. 100} \qquad \text{soit} \qquad N > \frac{s^2\, t^2}{e^2 \text{ p. } 100 . \bar{x}^2} .$$

On obtient ainsi le nombre de déterminations, ou de prélèvements nécessaires. N est d'autant plus grand que la variation relative dans l'unité ($s/\bar{x}$ = coefficient de variation) est forte, que l'on se fixe un risque de dépassement très faible (P petit et t grand) et que l'on exige une grande précision sur l'estimation (e petit).

Cette méthode est d'utilisation très simple, mais elle présente un inconvénient majeur : d'une part elle n'est utile que parce qu'elle sert à limiter l'effort d'enquête à un petit nombre d'échantillons, d'autre part c'est justement dans ce cas qu'il n'est plus possible d'être sûr de sa validité, à cause des lois statistiques invoquées, invérifiables, faute de données.

En revanche, en présence d'un très grand nombre de prélèvements, la certitude peut être plus grande, en particulier si on procède par voie expérimentale (Cameron *et al.*, 1971) : la moyenne générale est déterminée pour chaque caractère pédologique

numérique pris en compte. Ensuite, on extrait de l'ensemble des prélèvements un échantillon par tirage au sort. La moyenne d'échantillons est alors calculée ainsi que son écart à la moyenne générale. Ce dernier est jugé acceptable ou non. Puis le processus est répété plusieurs milliers de fois en changeant la fourchette d'acceptation ou la taille de l'échantillon. On en déduit, pour celui-ci, la taille minimale requise qui permet une précision donnée. Dans le cas d'une répartition normale les résultats sont très proches de ceux qu'on obtient par le calcul. On devait s'y attendre.

Une autre approche, très voisine dans son mode de réalisation pratique, se donne pour but non seulement de calculer le nombre de prélèvements nécessaires mais aussi de tester la validité de plans d'échantillonnage réalisés de manières diverses (Ball et Williams, 1971). Ce travail montre en particulier que la dispersion est souvent largement sous-estimée lorsque les échantillons pris en compte sont peu nombreux et choisis au hasard. En revanche, l'estimation de la moyenne peut être assez correcte dans le même cas.

Ces méthodes fournissent des résultats très intéressant pour l'étude cartographique considérée, mais sont difficilement extrapolables aux autres cas puisqu'ils dépendent du type de sol, du type de cartographie, de la qualité du travail d'échantillonnage, des caractères en cause, et, comme nous l'avons vu antérieurement du niveau auquel est calculée la variabilité. Aussi le tableau 1 qui suit et qui synthétise les résultats obtenus par plusieurs auteurs travaillant dans diverses conditions, n'a d'autre ambition que de montrer l'ordre de grandeur des résultats trouvés :

TABLEAU 1

Nombre d'échantillons nécessaires pour obtenir, au seuil de probabilité P = 0,05, *une estimation de la moyenne* ± 10 p. 100 *près*

(d'après Metz *et al.*, 1966 ; Ike et Clutter, 1968 ; Cipra *et al.*, 1972 ; Drees et Wilding, 1973)

Number of samples needed to obtain an estimation of the average at ± 10 p. 100, *at the* 5 p. 100 *probability level*

Déterminations (Pedological items)	Nombre minimum d'échantillons nécessaires, essais réalisés dans différentes conditions Minimum number of samples needed (trials realized in various conditions)		
	dans le meilleur cas (in the best case)	dans un cas moyen (in an average case)	dans le plus mauvais cas (in the worst case)
Matière organique ...	10	20	78
pH	1	1 ou 2	16
Fractions granulométriques	1	2 ou 3	6
Phosphore	18	100	5 100
Potassium.....	10	20 à 50	100

Il y a de quoi être inquiet, en ce qui concerne la recherche du phosphore notamment, bien qu'il faille tout de même préciser à quel niveau intervient la variabilité responsable de ces résultats. Il est par exemple évident dès le départ, que seul un très grand nombre d'analyses agronomiques (au moins une par parcelle), permettrait de

conseiller une fumure pour l'ensemble des agriculteurs d'une région. Il n'en reste pas moins que ces chiffres sont cohérents. Tous les travaux consultés qui traitent du nombre d'échantillons nécessaires, ou ce qui revient au même, de la variabilité, font apparaître la grande précision avec laquelle on peut estimer le pH et l'extrême difficulté de l'appréciation de la quantité de phosphore assimilable.

Un raisonnement statistique tout à fait comparable à celui qui a été utilisé plus haut permet de calculer jusqu'à quelle taille il faut accroître l'effectif de deux échantillons de profils pour qu'on puisse prouver que la différence de moyenne, pour tel caractère, entre l'un et l'autre est significative (Crosson et Protz, 1974).

b. — *Calcul du nombre de profils nécessaires*

La première démarche que nous allons envisager (Boulaine, 1966) part du principe qu'il faudrait théoriquement une observation pour chaque élément de surface qui figurera sur la carte. Or, on considère habituellement que la plus petite surface représentable est le quart de cm².

Un profil par quart de cm² équivaut à :

$$\frac{P}{S.(E)^2.10^8} = 4 \quad \text{soit} \quad \frac{P}{S} = 4.E^2.10^8$$

où :

P est le nombre de profils,

S est la surface en hectare,

E l'échelle.

En réalité cette densité *idéale* est très forte et on peut considérer que la *densité nécessaire* vaut seulement :

$$\frac{P}{S} = \frac{4}{K} \cdot E^2.10^8$$

où :

K est l'*efficience pédologique* et varie de 1 à 20 en fonction des facteurs suivants :

— documents accessoires disponibles : photos aériennes, cartes topographiques et géologiques...

— équation personnelle du cartographe,

— lisibilité du paysage.

Ainsi l'efficience pédologique pourra être minimale pour un paysage de forêt vierge, dans une région dépourvue de couverture topographique et géologique, avec un débutant en guise d'explorateur.

Cette méthode est intéressante à divers points de vue :

— elle montre le rôle considérable que peuvent jouer des facteurs difficiles à prendre en compte et les approximations qu'on est obligé de faire (de une à vingt fois),

— elle permet de calculer le nombre de profils à ouvrir :

$$P = \frac{4}{K} \cdot E^2.10^8.S\,,$$

— elle sert à comparer la densité réelle d'observation à la densité nécessaire et donc à définir le degré d'analyse du milieu (D° A) :

$$D^{o}\,A = \frac{P/S}{\frac{4}{K} \cdot E^{2}.10^{8}} = \frac{K.P}{4.E^{2}.10^{8}.S}.$$

— enfin, on peut déduire de tout cela l'échelle virtuelle, c'est-à-dire l'échelle pour laquelle le degré d'analyse serait égal à 1. Les équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} D^{o}\,A = \dfrac{K.P}{4.Er^{2}.10^{8}.S} \\ 1 = \dfrac{K.P}{4.Ev^{2}.10^{8}.S} \end{cases}$$

avec :

Ev = échelle virtuelle,
Er = échelle réelle,

d'où, après calcul :

$$Ev = Er.\sqrt{D^{o}\,A}\,.$$

En dépit des difficultés liées à l'estimation de l'efficient pédologique (K), il est manifeste que cette approche n'a pas encore été exploitée autant qu'il conviendrait par les pédologues de terrain, Anglais exceptés. En particulier les notions « échelle réelle-échelle virtuelle » devaient remplacer avantageusement les notions « échelle de la carte-échelle des levés » employées souvent dans des sens différents.

Une autre démarche (Legros, 1973-1), d'objectif pragmatique, tient en trois points :

1. Les études cartographiques déjà réalisées dans le cadre d'un service pédologique donné sont analysées. Il s'agit concrètement de bâtir, plus ou moins empiriquement, une formule qui met en relation la précision estimée et le contexte dans lequel celle-ci a été obtenue : nombre de profils, surface, nombre d'unités, échelle.

La formule proposée était la suivante :

$$F.C. = \frac{2\,P_{B} + P_{C}}{75.E.\sqrt{S.U}}$$

avec :

F.C. = finesse de caractérisation,
P_B = profil de type B (modal),
P_C = profil de type C (variation locale),
2 et 75 = coefficients arbitraires.

2. On demande aux auteurs des travaux s'ils pensent avoir disposé ou non, d'une information suffisante. Ceci permet d'étalonner les valeurs fournies par F.C. (Le coefficient 75 a d'ailleurs été introduit, pour que F.C. = 100 corresponde à un niveau jugé satisfaisant.)

3. Les valeurs ainsi trouvées sont utilisées pour planifier les travaux futurs. Considérons, par exemple, une étude au 25 000 réalisée sur 40 000 ha dans une zone

relativement hétérogène aux plans topographiques et géologiques. L'expérience montre qu'elle comprendra environ 40 unités de sols (cf. article sus-cité) avec, dans le cas général, 1/2 de P_B et 1/2 de P_C. Il faut alors :

$$1{,}5 . P = \frac{100 \times 75 \sqrt{40\,000 . 40}}{25\,000}$$

soit :

$$P = 253 \text{ profils}$$

plus concrètement :

$$200 < P < 300 .$$

Ce système est donc efficace mais il ne peut être utilisé dans un autre service sans ré-étalonnage préalable.

c. — *Calcul de la surface minimale à prospecter*

Le travail a été réalisé à Montpellier (Pourgaton, 1977), dans le cadre de nos travaux de cartographie assistée par ordinateur. Il s'agit de répondre à la question suivante : comment et jusqu'à quel niveau de détail mener une prospection cartographique de reconnaissance, afin d'obtenir une information de précision voulue sur un milieu inconnu qu'il convient de caractériser sommairement (à une échelle donnée). Pour cela, nous avons décidé d'exploiter les documents cartographiques déjà établis. Ceux-ci sont découpés en carrés selon une grille régulière. La taille des carrés est choisie pour que deux, trois ou quatre unités de sols se trouvent en moyenne représentées dans chacun. Le nom de ces unités est alors enregistré sur carte perforée (une carte par carré). Ensuite, divers programmes écrits en langage PL 1 permettent de regrouper ces carrés élémentaires suivant des assemblages plus ou moins importants, réalisés en ligne, en colonne, en surface (cf. fig. 1*a*). Chaque fois la superficie de l'assemblage est calculée ainsi que le nombre d'unités qui lui correspond sur le terrain.

On peut alors construire les courbes reliant le nombre d'unités rencontrées en moyenne à chaque niveau de regroupement, ceci pour chaque type de regroupement (fig. 1*b*).

Quelques tests, effectués sur des cartes levées à différentes échelles fournissent les résultats suivants :

— les transects, même disposés au hasard, sont toujours préférables à l'étude détaillée d'une surface échantillon car ils permettent, pour un effort de prospection comparable, de recouper un plus grand nombre d'unités de sols,

— à grande échelle, il suffit parfois de prospecter une surface échantillon représentant 20 p. 100 du total et choisie au hasard, pour rencontrer et donc caractériser 90 p. 100 des unités existantes sur toute la carte,

— à petite échelle, dès qu'on prend en compte plusieurs unités naturelles, les résultats s'effondrent et il n'y a plus d'extrapolation possible.

Nous espérons que la multiplication des essais permettra d'obtenir des chiffres assez précis pour être utilisés pratiquement avec de bonnes chances de succès.

Ann. agron., 1978, **29** (6), 525-644.

Table des matières

J. J. LONGUENESSE. — *Etude bibliographique.* — Température nocturne et photosynthèse 525

J. P. ANDRÉ. — Prévision des équilibres d'échange entre quatre cations dans un substrat de tourbe de sphaignes 541

Ph. BUSSIÈRES. — Loi de variation du pH d'un sol acide après apport de particules calcaires de caractéristiques différentes 559

J. P. LEGROS. — *Etude bibliographique.* Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. — Précision dans la caractérisation des unités de sols 583

H. METTAUER. — Contribution à l'étude des potentialités climatiques du Massif Vosgien..... 603

J. F. LEDENT. — Etude intravariétale des relations entre le rendement par épi et les caractères morphologiques chez le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) : relations morphologiques à la floraison 625

Contents

J. J. LONGUENESSE. — Night temperature and photosynthesis (*bibliographical review*)..... 525

J. P. ANDRÉ. — Forecasting the exchange equilibria between four cations in a sphagnum peat medium 541

Ph. BUSSIÈRES. — Law ruling pH variations in an acid soil after a supply of limestone particles with different characteristics..... 559

J. P. LEGROS. — Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography. II. — Precision in the characterizing of soil units (*bibliographical review*) 583

H. METTAUER. — Contribution to the study of the climatic potentialities of the Vosgian Mountain 603

J. F. LEDENT. — Relationships between culm yield and morphological characters within cultivars of wheat : morphological relationships at anthesis..... 625

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I. N. 8-036-006-5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F
— Le numéro: France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... 230,00 F

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... 55,00 F

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... 300,00 F

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn et M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... 80,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... 27,00 F

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... 38,00 F

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... 168,50 F

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... 168,50 F

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... 95,50 F

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... 63,50 F

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... 134,50 F

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... 173,00 F

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

niveaux dans les calculs. Enfin, comme la qualité de la cartographie dépend de très nombreux facteurs, il est évident que disposer d'une quantité d'information correcte est nécessaire, mais pas suffisant, pour être sûr de la validité du travail.

Dans ces conditions, les méthodes passées en revue fournissent des résultats qui ne sont que des indications. Il est cependant bon de les utiliser, ne serait-ce qu'en raison de la facilité de leur mise en œuvre. Elles servent à fixer les idées et peuvent rendre service à nombre de cartographes débutants.

II. — Qualité de l'information

Recueillir une information de qualité est évidemment essentiel. A ce niveau, divers problèmes doivent être envisagés :

— dans le cas d'une cartographie libre (free survey), il faut d'abord choisir l'emplacement des sondages à la tarière qui sont utilisés pour délimiter les unités, puis ensuite, il faut implanter les profils de la meilleure façon possible,

— dans le cas d'une cartographie par maille, il faut déterminer quelles doivent être la taille et la forme de cette dernière en considérant le problème sous toutes ses facettes et pas seulement en relation avec le nombre d'observations,

— dans les deux cas se posent les problèmes de qualité des méthodes d'observation et des méthodes de prélèvement.

a. — *Qualité du plan d'implantation des sondages à la tarière* (free survey)

Un sondage à la tarière n'extrait du sol que quelques kilogrammes de terre, si bien qu'en général, lors d'une cartographie libre, on n'explore directement qu'une infime proportion du terrain, un dimillionième peut-être. C'est tout à fait insuffisant, dans ce cas, pour tracer les limites par interpolation ou extrapolation. La démarche suivie, qui est caractéristique des sciences expérimentales, est la suivante :

— acquisition d'informations ponctuelles au moyen de sondages judicieusement placés,

— recherche de corrélations sol-environnement et élaboration d'une hypothèse de répartition des sols dans le milieu,

— tracé des limites et vérification ponctuelle de la validité du travail par d'autres sondages.

L'essentiel est donc de choisir, au mieux, l'emplacement des sondages qui vont créer l'information ou vérifier le raisonnement inductif. Pour cela, il faut alterner les diverses façons de procéder (Legros, 1973-2) et combiner conjointement :

1) Les répétitions réalisées sur un espace limité. Elles permettent de jauger la variabilité du sol à courte distance ainsi que la fidélité de cette méthode d'observation par sondage.

2) Les séquences. Leur objet est d'étudier la variation d'un facteur, les autres restant constants autant que possible. On parle de toposéquences et de chronoséquences (cf. en statistique les corrélations partielles). Mais les mots manquent et c'est

dommage, pour exprimer l'action qui consiste à tester l'influence de la végétation et de la roche, toutes choses étant égales par ailleurs.

3) L'échantillonnage systématique. Il s'agit de déterminer, à partir de l'ensemble des types de roches, de végétation, de morphologie, de climat, le nombre de combinaisons théoriquement possibles dans la région et qui définissent autant de milieux écologiques précis. Ensuite, on repère sur le terrain, parmi ces combinaisons, celles qui sont réellement représentées afin d'en étudier le sol. Cette démarche, déjà testée dans la région de St-Etienne (Legros, 1975) devient d'un emploi de plus en plus aisé maintenant que la cartographie par ordinateur permet de résoudre les deux principaux problèmes qui se posent dans ces conditions :

— la prise en compte simultanée de très nombreuses combinaisons de facteurs,

— la superposition de quatre ou cinq cartes monofactorielles, ce qui est aisé au moyen de l'ordinateur, alors que cela est difficilement praticable par le pédologue disposant seulement d'une table lumineuse et de maquettes sur support transparent.

4) Les semis de sondages. Une sorte de concession est faite à la cartographie par maille en plaçant ici ou là des observations isolées de façon à ne pas laisser vierge une trop grande surface de carte.

b. — *Qualité du plan d'implantation des profils (Free Survey)*

Pour implanter au mieux des profils dont le nombre global sera nécessairement limité par suite d'impératifs économiques, il faut tenir compte à la fois :

— de l'homogénéité. Ainsi que nous l'avons déjà vu, plus le sol est hétérogène, plus il faut d'échantillons pour le caractériser valablement. Pour une association pédologique à n composantes, il faut évidemment un minimum de n profils,

— de l'extension de l'unité qu'on veut caractériser,

— de l'intérêt que ce type de sol peut présenter au plan agronomique ou pédologique.

En fait, peu d'études ont porté sur ce problème de la qualité du plan d'implantation des profils dans le cas d'un « free survey ». Par exemple, vaut-il mieux, dans une unité pédologique, quarante profils dispersés ou vingt couples de deux profils ? Les réponses divergent suivant les régions prospectées et l'objectif poursuivi (Ike et Clutter, 1968 ; Ball et Williams, 1971) et les démonstrations sont complexes.

c. — *Distance optimale entre les profils (grid survey)*

Lorsque les profils sont régulièrement espacés et extrêmement nombreux, il devient concevable de tracer les limites et donc de construire la carte par interpolation. Le problème est alors de choisir une maille aussi lâche que possible afin de limiter les coûts. Un raisonnement intéressant a été développé en Angleterre (Webster et Cuanalo, 1975).

Des transects sont réalisés dans le milieu qui doit être cartographié. Ils consistent chacun en un alignement de très nombreux points d'observations équidistants, numérotés chaque fois de 1 à N. En chaque point, divers caractères quantitatifs sont déterminés. On calcule alors les coefficients d'auto-corrélation, c'est-à-dire les coefficients

de corrélations existant pour un caractère donné entre les observations de rang i et les observations de rang i + k (i variant de 1 à N — k et k variant de 0 à N — 1). La représentation graphique des valeurs de r en fonction des valeurs de k (traduites en mètres pour plus de commodité) fait alors apparaître une courbe sur laquelle les auteurs distinguent trois parties (cf. fig. 2*a*, 2*b*).

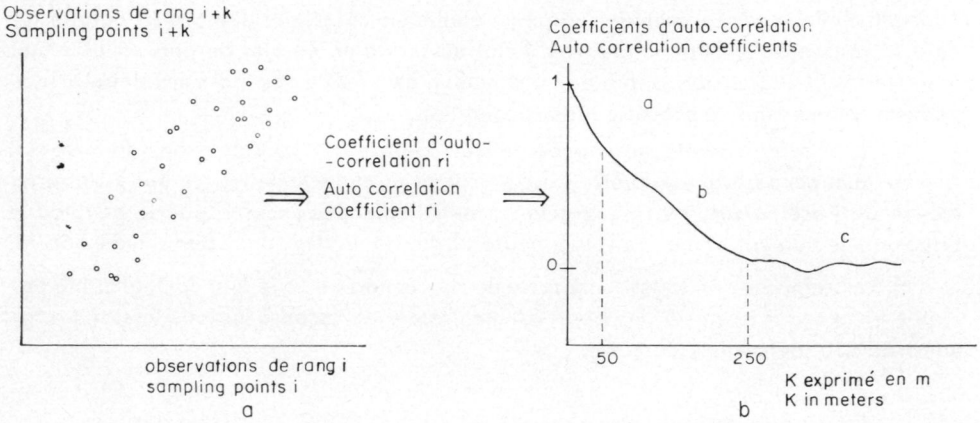


FIG. 2. — *Calcul de l'intervalle entre profils (cartographie par grille)* (d'après Webster et Cuanalo, 1975).
Average spacing between profiles (Grid Survey).

1) : a — Décroissance rapide. Deux observations successives sont donc relativement moins corrélées qu'il serait possible de l'imaginer. Ceci traduit la variabilité qui existe à l'intérieur de chaque unité de sol, d'où l'intérêt de réaliser plusieurs profils ou sondages groupés.

2) : b — Décroissance plus lente, quasi linéaire, qui indique que la corrélation entre deux points diminue proportionnellement à la distance qui les sépare.

3) : c — Une partie qui est voisine de zéro, aux erreurs aléatoires près. Il n'y a plus de corrélation donc plus d'extrapolation possible lorsque la distance entre deux observations est telle qu'on atteint cette partie de la courbe. Ceci fournit donc une indication tout à fait intéressante aidant à fixer la dimension de la maille.

Notons que divers calculs, effectués par les auteurs, montrent que cette distance est liée — dans l'exemple choisi — à la variabilité du substrat géologique.

Pour atteindre le même objectif, à partir du même type de transect, la variance peut être utilisée, à la place du coefficient d'auto-corrélation, compte tenu des propriétés d'additivité de celle-ci (Beckett et Bie, 1976). A l'aide de cette méthode les auteurs montrent que les différents caractères du sol subissent des variations en surface qui ne sont pas nécessairement semblables les unes aux autres. Il n'est donc pas possible de tirer de conclusion générale. Il faudra, dans chaque cas, considérer l'ensemble des caractères pédologiques qui doivent être pris en compte et calculer la maille en fonction de celui qui se révèle le moins stable dans l'espace (1).

(1) Le lecteur intéressé par ce problème se reportera également à un travail américain (Campbell, 1978) qui fournit une vision plus globale faisant intervenir la théorie des variables régionalisées.

Il existe enfin une approche qualitative de ce problème (Beckett et Bie, 1975). Les observations sont, comme précédemment, espacées d'une distance d sur une série de transects. On fait varier d et on considère tous les couples formés de deux observations successives. Il s'agit alors de noter si, oui ou non, le sol change plus d'une fois entre la première et la seconde observation de chaque couple. Il est évident que le nombre de oui doit être situé, en pourcentage, en-dessous d'un certain seuil, par exemple 10 p. 100. La valeur maximale acceptable pour d à l'échelle considérée et dans un milieu donné en est donc déduite.

d. — *Qualité des méthodes d'observation*

La qualité des observations est en progrès considérable depuis une dizaine d'années. Cette évolution a été induite par l'introduction du stockage informatique qui a nécessité :

1) L'élaboration de glossaires de description réalisés, en collaboration par un grand nombre de spécialistes provenant de plusieurs disciplines et de plusieurs pays (FAO, 1968 ; ORSTOM, 1969 ; Informatique et Biosphère, 1971 ; Agence de Coopération, 1978).

2) Le progrès tient aussi à la mise au point, dans le cadre de la plupart des organismes intéressés par le stockage informatique, de fiches de description-codification. Ceci a eu pour conséquence la diminution des oublis, l'affinement des diagnostics, l'amélioration de la fidélité en dépit d'une certaine banalisation de la description.

Dans ce domaine les méthodes statistiques de contrôle sont les suivantes :

1) On juge de la fidélité en demandant à tous les pédologues d'un service de décrire tout à tour le même profil (Legros, 1973-3).

2) On évalue la justesse du diagnostic au champ en vérifiant par analyse la validité des estimations initiales. Les rapports entre texture de terrain et granulométrie de laboratoire ont été particulièrement étudiés :

Dans certains cas la précision est tout juste moyenne puisque la classe texturale n'est définie exactement sur le terrain que dans 50 p. 100 des cas, en dépit de deux facteurs favorables (Foss *et al.*, 1975).

— Utilisation du triangle de texture USDA qui ne comprend que douze classes (contre dix-sept dans le triangle GEPPA).

— Utilisation d'une table précise de définitions. Par exemple un « silty clay loam » est sensé répondre aux critères suivants : « sensation collante et veloutée à l'état humide, possibilité de former des boules stables ainsi que des rubans entre pouce et index, propriétés plastiques modérées, friable à l'état frais, légèrement dur à l'état sec ».

Notons cependant que l'erreur n'est jamais considérable ; c'est le plus souvent une des classes texturales immédiatement voisine qui est fournie. Par ailleurs sables purs, argiles vraies, limons sont presque toujours reconnus avec exactitude.

Dans d'autres circonstances les observations de terrain sont remarquablement exactes, l'analyse de variance indiquant, par exemple, que l'estimation de la texture, lors de la description du profil, rend compte de 80 p. 100 de la variation de teneur en

argile et en limon, observée au laboratoire (Hodgson *et al.*, 1976). En revanche le test HCl 1/2 n'explique parfois que 50 p. 100 de la variation de la teneur en $CaCO_3$ du matériel pédologique (Legros, 1973-2).

e. — *Qualité des méthodes de prélèvement*

Le prélèvement des échantillons en vue de l'analyse pose toute une série de problèmes relatifs à la précision. Beaucoup restent encore sans réponse à l'heure actuelle probablement parce que le sujet, s'il est important, n'est guère passionnant. On peut se demander en effet :

— comment prélever : faut-il choisir le milieu de l'horizon ou bien faire un mélange de toutes les parties de celui-ci ? Ce qui est en cause, à ce niveau, c'est non seulement le résultat de l'analyse physico-chimique, mais aussi l'objectif (schématiser ou non le développement du profil). Dans notre laboratoire c'est la première solution qui est retenue : le profil, de même que la carte pédologique, est un modèle volontairement simplifié ;

— combien prélever : les déterminations granulométriques ne portent bien souvent que sur la terre fine à l'exclusion des fractions supérieures à 2 mm. Or, aussi bien pour l'aménagement que pour la pédogenèse, il est utile de connaître quelle est la proportion exacte de graviers, cailloux et blocs. Naturellement, plus les éléments grossiers sont volumineux, plus le prélèvement doit être important (Bourrier, 1959 ; Ponts et Chaussées, 1963) ;

— quand prélever : un certain nombre de caractères peuvent subir des variations importantes suivant les saisons ou simplement suivant l'état hydrique du profil (hydromorphie, pH, structure...). Sans négliger un certain nombre de tentatives, menées en particulier par l'INRA (par exemple prospections hivernales), il n'est pas certain que l'on tienne toujours suffisamment compte de ces phénomènes.

f. — *Discussion*

Il est bien difficile de tirer des idées générales relatives au problème de la qualité de l'information. En effet, les progrès sont très différents suivant les secteurs :

En ce qui concerne la description des profils une amélioration sensible est constatée, elle constitue une retombée indirecte de l'emploi des banques de données pédologiques. Mais plusieurs questions restent sans réponse quant aux méthodes d'échantillonnage et à la localisation précise des prélèvements. Compte tenu du rôle joué par les profils dans une cartographie et du prix de revient de ceux-ci (ouverture, description, analyses), il est permis de croire qu'il ne s'agit pas de problèmes négligeables...

III. — Précision des déterminations analytiques

Le problème n'est pas spécifique de la cartographie pédologique et ses solutions sont relativement bien connues, aussi nous passerons rapidement après avoir simplement rappelé quelques points fondamentaux.

Il existe essentiellement deux types d'erreurs :

— D'abord les erreurs accidentelles, dues à toute une série de facteurs jouant dans un sens ou dans un autre. Ceci se traduit, pour les résultats, par une dispersion aléatoire que l'on peut quantifier en calculant l'écart type. C'est la fidélité de la mesure qui est en cause. A ce niveau il est bon de rappeler que, par exemple, on trouve toujours la même valeur en pesant plusieurs fois un corps de 14 g sur une balance Roberval dont la sensibilité est de 10 g, alors qu'une dispersion des résultats apparaît en utilisant une balance au dixième de milligramme. Il serait faux d'en déduire que la première méthode est la plus précise. Autrement dit, la sensibilité de la mesure conditionne la fidélité de celle-ci et les deux notions doivent être appréciées ensemble.

— Ensuite, on observe des erreurs systématiques, encore appelées distorsions ou biais, qui affectent l'analyse dans un sens bien précis. Ce second type d'erreur est difficile à détecter car on peut recommencer x fois une mesure, obtenir des résultats très voisins et pourtant se tromper largement. Ici, c'est la justesse qui est en cause. La façon de détecter les biais a été exposée dans « Methods of Soil Analysis » (Almaras, 1965). Dans le principe, il s'agit de répéter la manipulation en modifiant un par un tous les facteurs qui interviennent. Par exemple, augmenter progressivement la quantité de terre soumise à l'analyse permettra de suspecter un biais additif, proportionnel, positif ou négatif en relation avec la valeur des coefficients a et b dans l'équation $y = a + bq$ où y est le résultat trouvé et q le poids de substance dosée.

Notons que les équivalents anglais des notions de fidélité et de justesse seraient respectivement « precision » et « accuracy » (Webster, 1975). En fait il est manifeste qu'il n'y a pas de consensus sur ces définitions et les deux termes sont souvent employés, l'un pour l'autre dans les publications anglo-saxones.

Le second point à souligner est que les calculs d'erreurs sont concevables dans plusieurs optiques :

1) Estimer la fourchette Δ dans laquelle se trouve probablement la moyenne de la population correspondant à l'échantillon analysé. S'il s'agit de répétitions analytiques, il est admis que la loi de Gauss s'applique dans ce cas :

$$\Delta = \pm \frac{t.s}{\sqrt{N}}$$

avec :

t trouvé à N — 1 degré de liberté dans la table de Student au seuil de probabilité 0,05 ou 0,01,

s écart type mesuré,

N nombre d'échantillons.

2) Estimer la fourchette dans laquelle une détermination supplémentaire éventuellement réalisée, viendra s'inscrire par exemple dans quatre-vingt-quinze cas sur cent. On utilise alors :

$$\Delta = \pm t.s .$$

Dans le premier cas, et à un degré moindre dans le second, la fourchette obtenue n'est pas assez large pour englober tous les résultats trouvés. Cela donne parfois une image rassurante et parfaitement fausse de l'expérimentation surtout lorsque les valeurs extrêmes sont importantes. Rappelons qu'il est possible de se noyer dans une

rivière dont la profondeur moyenne est de 20 cm (Kane, 1971). Dans ce cas, il vaut mieux utiliser la méthode qui prévaut en physique :

$$\bar{x} = \frac{x \text{ min.} + x \text{ max.}}{2} \pm \frac{x \text{ max.} - x \text{ min.}}{2} .$$

La précision est une notion relative qui ne peut être appréciée indépendamment du contexte dans laquelle elle a été définie. Prenons l'exemple d'une détermination du carbone : l'échantillon prélevé sur le terrain, puis tamisé et broyé est fourni à un opérateur qui en extrait un gramme, affine le broyage et effectue l'analyse. Qu'est-ce donc, dans ces conditions, qu'une répétition ? S'agit-il seulement d'un deuxième dosage, d'une seconde extraction d'un gramme, d'un nouveau prélèvement sur le terrain ? D'où l'intérêt des gros laboratoires d'analyses qui travaillent d'une manière standardisée et reproductible.

Quel que soit l'intérêt de ces questions, l'ensemble des spécialistes s'accordent pour penser que les erreurs, au niveau du laboratoire, sont généralement négligeables par rapport aux erreurs liées à l'échantillonnage sur le terrain (Hende A. Van Den *et al.*, 1957 ; Lobert et Cormary, 1964 ; Dupuis, 1972). Notons que certains travaux montrent comment on peut estimer la justesse et la reproductibilité d'une nouvelle méthode d'analyse (Arinushkina *et al.*, 1968).

Conclusion

L'apport de la statistique et de l'informatique est important en cartographie pédologique. Des méthodes numériques ayant spécialement pour objet le contrôle de la qualité ont été développées spécifiquement ou bien empruntées à d'autres disciplines et adaptées. Il en résulte que la part de subjectivité liée à l'interprétation personnelle du cartographe est contrôlable, *a posteriori*, et même peut diminuer lorsqu'un certain nombre de mesures et de calculs aident à prendre les décisions d'une manière plus rationnelle.

Cela ne signifie pas pour autant que tout soit satisfaisant. Le statisticien professionnel ne manquera pas de remarquer que l'intervention de sa discipline est bien tardive ; « *Post Mortem* » disent les spécialistes puisqu'il s'agit de contrôles et non de la définition d'un protocole d'échantillonnage. De plus, quels que soient les efforts et les désirs, chacune des méthodes que nous avons présentées ne peut prétendre apporter qu'une solution partielle concernant un point seulement de la méthodologie de l'inventaire des sols. Or, il est évident que, sauf cas exceptionnel, un pédologue de terrain ne peut disposer du temps nécessaire à la mise en œuvre de toute la batterie de tests et de contrôles disponibles.

Dans ces conditions chacun doit actuellement faire un choix en fonction des problèmes posés et en fonction des moyens statistiques et informatiques accessibles facilement.

A l'avenir, l'automation qui prévaut déjà au niveau des calculs devra s'étendre au niveau de leur préparation, et même à celui de la collecte de certaines données. C'est là un des rôles futurs de la cartographie assistée par ordinateur. Bien sûr, toute réduction mathématique d'une réalité naturelle reste forcément approximative et ne

peut constituer qu'un test plus ou moins critiquable. Aussi, il est probable qu'aucune des méthodes présentées n'ait pu pleinement satisfaire le lecteur averti. Il n'en demeure pas moins que l'ensemble constitue un progrès appréciable comptant, à notre avis, parmi les plus importantes acquisitions récentes de la pédologie.

On regrettera que la contribution Française n'ait pas été plus large bien qu'on ne puisse pas la considérer comme négligeable. Cela traduit tout simplement le fait que le nombre de spécialistes de l'Hexagone est nettement plus faible que celui des pédologues informaticiens anglais, canadiens et bien sûr américains. Il est vrai qu'une étude bibliographique, portant spécifiquement sur la cartographie assistée par ordinateur ou sur les banques de données, aurait révélé un apport français nettement plus important, prééminent même dans certains cas. C'est pourquoi nous avons jugé utile de synthétiser d'abord ce qui pouvait paraître le moins familier et donc le plus utile.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Summary

Bibliographical study

Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography

II. — *Precision in the characterizing of soil units*

In this second part of the bibliographical study on the search for and checking of the precision in pedological cartography are dealt with :

— the computation of the amount of necessary informations (number of samples, number of profiles, area to prospect). These methods are seductive and useful but remain approximate because of a deficient exactness at the statistical level and because they imply that the precision to be considered as correct in known ;

— the quality of the observations. It is continuously increasing in particular because of the coming out of data banks. However many problems raised are not yet satisfactorily solved ;

— the precision of the analytical determinations. It must be taken into account but is generally sufficient. The true problem is the representativeness and significance of the result obtained.

Some of these methods are easy to apply. Others demand a dataprocessing equipment, a bank of pedological data and a thorough knowledge of the modern statistics. The contribution seems as sufficient to lead even now to a reconsideration of the principle and technique of the cartography (pedological or else). The cartography will be more and more dependent on computers in the future.

Zusammenfassung

Bibliographische Untersuchung

Suche Nach und numerische Kontrolle der Prazision in Bodenkartographie

II. — *Prazision in das Kennzeicnen der Bodeneinheiten*

Im diesen zweiten Teil dieser der bibliographischen Untersuchung, die der Erforschung und Kontrolle der Präzision in der Bodenkartographie gewidmet ist werden besprochen :

— die Berechnung der Anzahl von nötigen Informationen (Zahl der Stichproben, Zahl der Profile, zu prüfende Fläche). Diese Methoden sind viel versptechend und nützlich, aber bleiben doch annähernd mangels Schärfe in der Statistik und weil sie die als richtig zu betrachtende Präzision als bekannt vorraussetzen ;

— die Qualität der Beobachtungen. Sie nimmt fortdauernd insbesondere wegen der Entstehung von Datenbanken 34. Aber viele gestellten Fragen bleichen noch ohne befriedigende Lösung ;

— die Präzision der analytischen Bestimmungen. Sie ist Sicherlich betrachten swert aber allgemeinerweise ausreichend. Die wirkliche Frage ist der repräsentative Charakter und die Bedeutung des erzielten Ergebnisses.

Ein ige dieser Methode sind leicht anzuwenden. Andere fordern Datenverarbeitungsanlagen eine Bank von Bodenangaben und eine gute Kenntnis der modernen Statistik. Im ganzen genommen scheint ans der Beitrag genügend für eine sofortige Veränderung des Prinzips und der Technik der Kartographie (Bodenkartographie order sotistige) Die Kartographie ist mehr und mehr auf Datenverarbeitungsanlagenbeistand ausgerichtet.

РЕЗЮМЕ

Исследование и числовой контроль точности в педологической картографии. Библиографичесуое изучение

II. — Точность охарактеризования почвенных единиц.

ЛЕГРО Ж. П.

В этой второй части библиографического анализа, посвященного исследованию и контролю точности педологической картографии, рассматриваются :

— Рассчет количества необходимых информаций (число образцов, количество профилей, площадь проспектирования). Несмотря на их пользу и соблазнительность, методы эти остаются приблизительными, из-за отсутствия пунктуальности в статистическом плане, и так как они предполагают известной точность рассматривающуюся как коректную.

— Качество наблюдний. Благодаря созданию банков данных, оно постоянно улучмается. Но много проблем остаются еще недостаточно решенными.

— Точность аналитических определений. Она необходима, но в большинстве случаев вполне достаточна. Главной проблемой являются здесь показательность и значение полученного результата.

Некоторые из указанных методов легко осуществимы. Другие - требуют применения средств информатики, существования банка педологических данных и солидного знакомства с модерной статистикой. Но, общий вклад нам кажется достаточным чтобы можно было немедленно приступить к пересмотру принципов и техники картографии (педологической или иных). Картография ориентируется теперь все больше и больше к применению Э. В. М.

Références bibliographiques

AGENCE DE COOPÉRATION CULTURELLE ET TECHNIQUE, 1979. *Etude sur l'échange de données pédologiques par ordinateur*. Paris. 200 p.

ALMARAS R. R., 1965. Bias. In *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, 24-42.

AMOS D. F., WHITESIDE E. P., 1975. Mapping accuracy of a contemporary soil survey in an urbanizing area. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** (5), 937-942.

ARINUSHKINA YE. V., DMITRIYEV YE. A., MINENKOVA YE. P., 1968. Accuracy of methods for total chemical analysis of the mineral part of soils. *Soviet Soil Sci.*, **10,** 1397-1404.

AUXENFANTS G., 1976. Méthodes de l'analyse de données et science du sol : du problème pédologique au protocole d'analyse, du protocole aux résultats. *Bull. Inform. Biopsh.*, **6,** 31-68.

BALL D. F., WILLIAMS W. M., 1971. Further studies on variability of soil chemical properties : efficiency of sampling, programms on an uncultivated brownearth. *J. Soil Sci.*, **22** (1), 60-68.

BASCOMB C. L., JARVIS M. G., 1976. Variability in three areas of the Denchworth Soil Map Unit. I. Purity of the map unit and property variability within it. *J. Soil Sci.*, **27** (3), 420-437.

BECKETT P. H. T., 1968. Methods and scale of land resource surveys, in relation to precision and cost. In *Land Evaluation*. Division of land Research CSIRO, Australia, 53-63.

BECKETT P. H. T., WEBSTER R., 1971. Soil variability : a review. *Soils and Fertilizers*, **34** (1), 1-15.

BECKETT P. H. T., BURROUGH P. A., 1971-1. The relation between cost and utility in soil survey: IV. Comparison of the utilities of soil maps produced by different survey procedures, and to different scales. *J. Soil Sci.*, **22** (4), 466-480.

BECKETT P. H. T., BURROUGH P. A., 1971-2. The relation between cost and utility in soil survey. V. The cost effectiveness of different soil survey procedures. *J. Soil Sci.*, **22** (4), 481-489.

BECKETT P. H. T., BIE S. W., 1975. Reconnaissance for soil survey. I. Pre-survey estimates of the density of soil boundaries necessary to produce pure mapping units. *J. Soil Sci.*, **26** (2), 144-154.

BECKETT P. H. T., BIE S. W., 1976. Reconnaissance for soil survey. II. Pre-survey estimates of the intricacy of the soil pattern., *J. Soil Sci.*, **27** (1), 101-110.

BIE S. W., BECKETT P. H. T., 1971-1. Quality control in soil survey. Introduction. I. The choice of the mapping unit. *J. Soil Sci.*, **22** (1), 32-49.

BIE S. W., BECKETT P. H. T., 1971-2. Quality control in soil survey. II. The cost of soil survey. *J. Soil Sci.* **22** (4), 453-465.

BOULAINE J., 1966. Sur la précision des cartes pédologiques. *Cah. ORSTOM, pédol.*, **4** (1), 3-7.

BOURRIER J., 1959. *Problèmes posés par la présence de cailloux dans les sols irrigués*. Direction Générale du Génie Rural. Imprimerie Nationale. Paris, 76 p.

BRIGGS K. G., 1974. Soil sampling and soil uniformity for N, P, K, in a small plot area. *Canad. J. Soil Sci.*, **54** (1), 115-117.

BURROUGH P. A., BECKETT P. H. T., JARVIS M. G., 1971. The relation between cost and utility in Soil Survey. I à III. *J. Soil Sci.* **22** (3), 554-571.

CALLEBAUT R., DE LEENHEER L., 1966. Evaluation de l'homogénéité du sol comme milieu de croissance à l'aide d'essais à blanc sur des grands champs d'expérimentation. *Pédologie*, **16** (1), 42-74.

CAMERON D. R., NYBORG M., TOOGOOD J. A., LAVERTY D. H., 1971. Accuracy of field sampling for soil test. *Canad. J. Soil Sci.*, **51** (2), 165-175.

CAMPBELL J. B., 1977. Variation of selected properties across a soil boundary. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41** (3), 578-582.

CAMPBELL J. B., 1978. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineation of two soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **42** (5).

CASSEL D. K., BAUER A., 1975. Spatial variability in soils below depth of tillage : bulk density and fifteen atmosphere percentage. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **39** (2), 247-250.

CIPRA J. E., BIDWELL O. W., WHITNEY D. A., FEYERHERM A. M., 1972. Variations with distance in selected fertility measurements of pedons of western Kansas Ustoll. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36** (1), 111-115.

COINTEPAS J. P., 1974. Application d'une analyse multivariable à quelques problèmes de pédogénèse en Tunisie. *Cah. ORSTOM pédol.*, **12** (2), 145-171.

COMMONWEALTH BUREAU OF SOILS, 1966. *Bibliography on variability of soil samples taken for chemical analysis*. Harpenden. England, 11 p.

COURTNEY F. M., WEBSTER R., 1972. A taxometric study of the Sherborne soil mapping unit., 113-124.

CROSSON L. S. ,PROTZ R., 1974. Quantitative comparison of two closely related soil mapping-units. *Canad. J. Soil Sci.*, **54** (1), 7-14.

DE GRUIJTER J. J., 1977. *Numerical classification of soils and its application in survey*. Center for Agricultural publishing and documentation. Wageningen, 117 p.

DMITRIEYEV Y. E. A., 1966. Determination of the necessary number of replications in the experimental work of a soil scientist. *Soviet Soil Sci.*, **13,** 1590-1597.

DREES L. R., WILDING L. P., 1973. Elemental variability within a sampling unit. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37** (1), 82-87.

DUPUIS M., 1972. *Notions sur l'analyse du sol*. Doc. ronéo. S.E.S. n° 194, Montpellier, 28 p.

FAVROT J. C., BOUZIGUES R., 1975. *Etudes préliminaires en vue du drainage des terres agricoles du Sud-Ouest du département de l'Eure*. Etude pédologique S.E.S. n° 238. Montpellier, 239 p.

F. A. O., 1978. *Directives pour la description des sols*. Rome, 58 p.

FOSS J. E., WRIGHT W. R., COLES R. H., 1975. Testing the accuracy of field textures. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39** (4), 800-802.

G.E.P.P.A. *Modèle de marché pour une étude de sols*. Ministère de l'Agriculture. Direction des Aménagements ruraux. Service de l'hydraulique, 21 p.

GIRARD M. C., 1968. *Approche statistique de la notion de série*. Thèse de 3e cycle, Faculté des Sciences Paris.

GIRARD M. C., 1970. Etude statistique des notions de type et de phase sur un sol méditerranéen. *Cah. ORSTOM, pédol.*, **VIII,** (3), 349-375.

GIRARD C. M., GIRARD M. C., 1975. *Application de la télédétection à l'étude de la biosphère*. Masson 186 p.

GIRARD M. C., 1976-1. Recherche d'une méthode pédologique en matière de traitement statistique des données de sol. Application à la toxonomie et à la cartographie *Sci. Sol* 3, 177-204.

GIRARD M. C., 1976-2. Essai de classement des sols calcaires par traitement statistique. Comparaison avec la classification française. *Pédologie*, **26** (3), 225-254.

GOLDEL'MAN Y. M., PUGAYEV A. N., 1976. Heterogeneity of the soil cover in central and Southeastern Kamchatka. *Soviet Soil Sci.*, **6.**

HENDE A. VAN DEN, COTTENIE A., HOLLANDER R. d'., 1957. The importance of average samples in the chemical analysis of soil. *Pédologie*, 7.

HODGSON J. M., HOLLIS J. M., JONES R. J. A., PALMER R. C., 1976. A comparison of field estimates and laboratory analyses of the silt and clay contents of some West Midland Soils. *J. Soil Sci.*, **27** (3), 411-419.

IKE A. F., CLUTTER J. L., 1968. The variability of forest soils of the Georgia Blue Ridge Mountains. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (2), 284-288.

INFORMATIQUE ET BIOSPHÈRE, 1971. *Glossaire de description de l'environnement en vue du traitement informatique*. Paris, 173 p.

JAMAGNE M., 1967. Base et technique d'une cartographie des sols. *Numéro hors série. Ann. agron.*, **18,** 142 p.

JANSEN I. J., ARNOLD R. W., 1976. Defining ranges of soil characteristics. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* **40** (1), 89-92.

KANE E. J., 1971. *Statistique et Econométrie*. Armand Colin. Collection U.

KLOOSTERMAN B., LAVKULICH L. M., 1973. Grouping of Lower Fraser Valley soils of British Columbia by numerical Methods. *Canad. J. Soil Sci.*, **53** (4), 435-443.

KLOOSTERMAN B., LAVKULICH L. M., JOHN M. K., 1974. Use of a soil data file for pedological research. *Canad J. Soil Sci.*, **54** (2), 195-204.

LEGROS J. P., 1973-1. Précision des cartes pédologiques. La notion de finesse de caractérisation. *Sci. Sol, Bull. Assoc. fr. Etud. Sol.* 2, 115-128.

LEGROS J. P., 1973-2. *Eléments de statistique appliqués à la Science du Sol. Principe des calculs. Applications. Cas de la cartographie pédologique* S.E.S. nº 214. Ronéo, Montpellier, 110 p.

LEGROS J. P., 1973-3. *Enquête sur la précision des descriptions de profils pédologiques*. Ronéo. S.E.S. nº 211. Montpellier, 16 p.

LEGROS J. P., 1975. Occurrence des podzols dans l'Est du Massif Central. *Sci. Sol*, 1, 37-49.

LEGROS J. P., 1978. *Etude bibliographique*. Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. — Précision dans la délimitation des sols. *Ann. agron.* **29** (5), 499-519.

LOBERT A., CORMARY Y., 1964. Variabilité des mesures de caractéristiques hydrodynamiques. *Cah. ORSTOM, pédol.*, **2** (2), 23-49.

MABBUTT J. A., 1968. Review of concepts of land classification. In *Land evaluation*. Division of land Reserach. C.S.I.R.O. Australie, 11-28.

MAIGNIEN R., 1969. Manuel de prospection pédologique. *Documents techniques, ORSTOM*, 132 p.

MAKHLIN T. B., 1973. Approximation by Johnson's curves of the distribution functions of soil constituents. *Soviet Soil Sci.*, **5** (3), 368-375.

MAUSEL P. W., RUNGE E. C. A., CARMER S. G., 1970-1. Use of sample data and seventh approximation criteria in delineating areas of similar soils,. 2. Accuracy in the identification of subgroups delinaeted by a sample-based soil association map. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **34** (3), 657-664.

McCORMACK D. E., WILDING L. P., 1969. Variation of soil properties within mapping units of soils with contrasting substrata in Northwestern Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33** (4), 587-593.

McKEAGUE J. A., DAY J. H., SHIELDS J. A., 1971. Evaluating relation ships among soil properties by computer analysis. *Can. J. Soil Sci.* **51** (1), 105-111.

METZ L. J., WELLS C. G., SWINDEL B. F., 1966. Sampling soil and foliage in a pine plantation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30,** (3), 397-399.

NAERT B., 1977. Cartographie des sols et interprétation photographique des données. *Photo Interprétation*, 3, 1-36 et 4, 1-49.

NORRIS J. M., 1971-1. The application of multivariate analysis to soil studies. I. — Grouping of soils using different properties. *J. Soil Sci.*, **22** (1), 69-80.

NORRIS J. M., 1971-2. Comparison of different methods in the transition matrix approach to the numerical classification of soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35** (6), 965-968.

NORRIS J. M., DALE M. B., 1971. Transition matrix approach to numerical classification of soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35** (3), 487-491.

ORSTOM, 1969. *Glossaire de description des horizons en vue du traitement informatique*. Paris, 82 p.

PEYRONEL A., 1977. *Bibliographie sommaire sur le thème de la télédétection appliquée à la cartographie des sols*. Ronéo S.E.S. Montpellier, 15 p.

PONTS ET CHAUSSÉES, 1963. *Analyse granulométrique par tamisage. Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. Dunod.

POURGATON M., 1977. *Introduction à l'étude statistique de la notion de province pédologique*. Mémoire D.E.A. ENSAM, 42 p.

POWELL J. C., SPRINGER M. E., 1965. Composition and precision of classification of several mapping units of the Appling, Cecil and Lloyd series in Walton County, Georgia, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29** (4), 454-458.

RAGG J. M., 1977. The recording and organization of soil field data for computer areal mapping. *Geoderma*, **19** (2), 81-89.

ROZHKOV V. A., 1974. Coordinate-statistical approach to the objective classification of soils *Geoderma*, **12** (1/2), 175-182.

ROZHKOV V. A., 1975. Method of centroid components and its application in soil science. *Soviet Soil Sci.*, **7** (5), 613-622.

RUDEFORTH C. C., 1969. *Offprint from the Welsh Soils Discussion Group*. Report 10, 42-48.

SERVICE D'ÉTUDE DES SOLS, 1972. *Les sols dans le paysage et leurs aménagements*. S.E.S. Montpellier, n° 175, 174 p.

SOANE B. D., CAMPBELL D. J., HERKES M., 1971. Computer analysis for the classification of soils on the basis of mechanical properties.

SOIL SURVEY STAFF, 1951. *Soil Survey Manual*. United States Departement of Agriculture. U.S.A., 503 p.

TOMLINSON P. R., 1970. Variations in the usefulness of rapid soil Mapping in the Nigerian Savanna *J. Soil Sci.*, **21** (1), 162-172.

TONKONOGOV V. D., 1971. Experimental statistical analysis of geographic soil formation pattern using the sandy podzol of the northern part of the russian as an example. *Soviet Soil Sci.*, **3** (1), 29-39.

VALENTINE K. W G., LORD T. M., WATT W., BEDWANY A. L., 1971. Soil mapping accuracy from black and white color, and infrared aerial photography. *Can. J. Soil Sci.*, **51** (3), 461-469.

VAL'KOV V. F., KLIMENKO G. G., PRODAN V. I., 1975. Evaluation of genetic soil characteristics and their variation. *Soviet Soil Sci.*, **7** (6), 629-636.

VAN DEN DRIESSCHE R., GARCIA GOMEZ A., 1972. Distances non paramétriques entre profils. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **IX** (4), 617-628.

VAZHENIN I. G., DOLGOPOLOVA R. V., SNETKOVA A. P., 1969. Microvariations of characteristics and properties of soils within a soil profile. *Soviet Soil Sci.*, 2, 141-156.

VINTILA L., CANARACHE A., 1974. Some general features of the frequency distributions used in soil science. 10e *Congrès Intern. Sci. Sol*, **VI,** (II), 676-683.

WALKER P. H., HALL G. F., PROTZ R., 1988. Soil trends and variability across selected landscapes in Iowa. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (1), 97-101.

WEBSTER R., 1971. Wilk's criterion : a measure for comparing the value of general purpose soil classifications. *J. Soil Sci.*, **22,** (2), 254-260.

WEBSTER R., 1973. Automatic soil-boundary location from transect data. *Mathematical geology*, **5** (1), 27-37.

WEBSTER R., 1975-1. Sampling, classification and quality control. *Proceedings of the meeting on soil Information system*. Wageningen. Pudoc, 65-72.

WEBSTER R., CUANALO DE LA C., H. E., 1975. Soil Transect correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. *Soil Sci.* **26** (2), 176-194.

WEBSTER R., 1977. *Quantitative and numerical methods in soil classification and survey*. Monographs on Soil Survey. Clarendon Press. Oxford, 269 p.

WILDING L. P. JONES R. B., SCHAFER G. M., 1965. Variation of soil morphological properties within Miami, Celina and Crosby mapping units in West-Central Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29** (6), 711-717.

Ann. agron., 1978, **29** (6), 603-623.

Contribution à l'étude des potentialités climatiques du massif Vosgien

H. METTAUER

avec la collaboration technique de Christiane HUCK

Station d'agronomie
Centre de Recherches agronomiques de Colmar, I.N.R.A.,
28, *rue de Herlisheim* 68000 *Colmar*

Résumé

La caractérisation des potentialités climatiques des différents étages de végétation du Massif Vosgien a été réalisée à travers l'étude de la productivité de quelques graminées de variétés sélectionnées, semées dans différents sites, en vases enterrés, sur même substrat et avec la même fumure supérieure aux besoins. La réponse globale des plantes tests a ainsi permis de comparer les conditions climatiques des différents sites en tant que facteurs de production. Les résultats obtenus montrent que ce classement a été possible en prenant comme référence les rendements de la fléole et du dactyle. Ce classement confirme sensiblement celui calculé à partir de l'indice de potentialité agricole de Turc.

Trois principales zones climatiques ont été définies, une zone intermédiaire à potentialité élevée, entourée par deux zones présentant chacune un facteur limitant : sécheresse pour les sorties de vallée, faible température pour la zone de montagne. Un double calendrier d'exploitation a été défini, l'un relatif à la fauche à partir de repères phénologiques, l'autre relatif à la pâture à partir des résultats expérimentaux.

L'auteur a également pu mettre en évidence la relation négative entre rendement et déficit hydrique.

Les résultats obtenus sont transposables à la majorité des vallées vosgiennes.

A. — Introduction

D'une manière générale l'étude des potentialités d'une région débute par la réalisation de cartes des sols, de leurs aptitudes et de leur extension géographique. Mais une approche plus complète implique l'adjonction de données d'écologie, de topographie, de climatologie. Langlet *et al.* (1969, 1971) ont dégagé, pour la région Midi-Pyrénées, une vue d'ensemble des potentialités de production des petites régions naturelles en hiérarchisant les facteurs favorables et les contraintes selon la nature et l'intensité de leurs actions sur les principales cultures. Ils ont complété ces études par l'adjonction de références obtenues à partir d'enquêtes menées auprès des exploitations intensives et de données expérimentales à partir d'essais simples, de type démonstration plurilocales. Hénin (1953) et Drouineau (1963) ont montré que les potentialités de production et les aptitudes culturales des différents milieux sont sur-

tout influencés par le « degré de prohibition » que les contraintes écologiques exercent sur les cultures envisagées.

En zone de montage où la recherche d'un affranchissement des contraintes climatiques est illusoire, Hédin et Kerguelen (1963), Fauché et de Montard (1975), Deffontaines (1967) en France, Lambert et Toussaint (1973) en Belgique, Caputa (1969) en Suisse, Könekamp *et al.* (1959) en Allemagne, Caputa et Schechtner (1970) en Autriche, ont étudié les potentialités des prairies naturelles en fonction du climat, du sol et des facteurs techniques.

Au niveau des potentialités proprement climatiques on dispose de moins d'informations quant aux effets directs de ces conditions sur la productivité des fourrages. Le groupe d'étude des herbages de montagne de la FAO a, par exemple, étudié l'influence de l'altitude sur les rendements et la croissance des plantes fourragères et effectué des observations phénologiques sur différentes espèces, compte tenu des conditions thermiques à différentes altitudes et dans différentes régions de montagne. Talamucci (1976) a chiffré les potentialités à différentes altitudes des terres en friche de la montagne toscane à l'aide de graminées sélectionnées. La productivité ou l'aptitude d'une culture à élaborer une masse de matière sèche étant déterminée par l'incidence du climat sur le complexe plante, technique, sol, différents auteurs ont aussi créé des indices climatiques de potentialité agricole, soit de portée générale (Turc 1967, 1972), soit de portée locale (Félix et Rauzy, 1971).

Toutes ces considérations nous ont conduit à appréhender, d'une manière aussi fine que possible, l'effet propre du climat montagnard sur la productivité et la qualité des plantes prairiales. Ce travail a été effectué dans le cadre plus général d'une étude des potentialités agricoles du Massif Vosgien et de ses vallées dont la surface toujours en herbe représente 65 p. 100 de la S.A.U.

Du fait de la situation géographique et de la configuration du fossé rhénan, orienté Nord-Sud, les vallées vosgiennes qui entaillent profondément le Massif sur son versant Est présentent un gradient pluviométrique très élevé (on passe de 600 mm de pluie dans la plaine d'Alsace à 2 000 mm sur les crêtes en moins de 30 km de distance). A cette variation extrême de pluviométrie viennent s'ajouter les effets thermiques dus à l'altitude et à l'encaissement des vallées.

L'étude des potentialités climatiques peut s'envisager à l'aide de méthodes d'artificialisation très poussées (phytotrons); nous avons préféré étudier la variabilité naturelle de ce complexe climatique pluie-température difficilement dissociable et son influence sur la productivité et la qualité de quelques graminées sélectionnées, cultivées en monoculture.

B. — Méthodologie. Matériel

La réalisation de notre objectif, à savoir la caractérisation à l'aide d'un test biologique des potentialités des principales zones climatiques correspondant aux différents étages de végétation (chênaie-chataîgneraie, hêtraie-sapinière, hêtraie d'altitude, lande somnitale) posait un problème méthodologique. En effet, cette démarche maintenait deux variables importantes : le sol avec son potentiel chimique propre et le climat.

Pour éliminer l'effet dû à l'hétérogénéité des sols naturels, nous avons mis en place, le long du bassin versant de la principale vallée vosgienne (vallée de Munster), une chaîne de cinq sites caractéristiques des différents étages de végétation au niveau desquels nous avons réalisé des semis en vases enterrés sur même substrat et avec la même fumure.

Choix des sites

Les travaux effectués comprennent deux séries d'essais : la première série, sur 3 ans (1968-70) intéresse la zone plus proprement alluviale de la vallée, la seconde, sur 4 ans (1971-74) concerne l'ensemble du bassin versant.

Nous avons retenu pour la première série les trois sites suivants : St-Gilles à l'entrée de la vallée (alt. 250 m, pluie 690 mm), Luttenbach vers le milieu (alt. 420 m, pluie 970 mm) et Mittlach au fond de la vallée (alt. 520 m, pluie 1 580 m). Pour la deuxième série d'essais, nous avons complété cette chaîne par l'adjonction de deux sites d'altitude, le Schnepfenried (alt. 900 m, pluie 1 700 mm), situé dans l'étage de la hêtraie-sapinière et le Rain (Nonselkopf, alt. 1 250 m, pluie 1 800 mm), représentatif de l'étage de la lande sommitale.

Sol et fumure

Nous avons utilisé le même substrat pour tous les sites : sol procédant d'une arène granitique et représentant assez bien le type le plus courant rencontré dans la vallée (tabl. 1). Les vases utilisés étaient en plastique d'une contenance de 30 l (soit environ

TABLEAU 1

Résultats analytiques du sol utilisé

Physical and chemical analysis of the soil

Analyse physique (sur terre sèche)	
Argile < 2 µ p. 100	9,4
Limon 2 µ — 20 µ p. 100	9,7
Sable très fin 20 — 50 µ p. 100	6,6
Sable fin 50 — 200 µ p. 100	10,5
Sable grossier 200 — 2 000 µ p. 100	62,7
Matières organiques totales p. 100	1,1
pH (eau)	6,0
Analyse chimique (sur terre sèche)	
Carbone organique (Anne) p. 1 000	6,31
Azote total p. 1 000	0,50
Rapport C/N	12,5
P_2O_5 assimilable (Dyer) p. 1 000	0,89
Capacité d'échange (Metson) T meq. p. 100 g	7,71
K échangeable meq p. 100 g	0,22
Ca échangeable meq. p. 100 g	3,63
Mg échangeable meq. p. 100 g	1,08
Na échangeable meq. p. 100 g	0,03
Taux de saturation S/T p. 100	64,1
Humidité équivalente (1 000 g) p. 100	16,2
Humidité à pF = 4,2 p. 100	6,3

40 kg de sol) et perforés à la base *. Nous avons enterré les vases de manière à éviter tout échauffement anormal du substrat et à y maintenir une température proche de celle qui existe dans le sol en place des différents sites, du fait du bilan d'énergie. Nous avons retenu quatre répétitions par traitement.

La fumure pratiquée est résumée dans le tableau 2 :

TABLEAU 2

Fumure (*en* kg/ha)
Fertilization (kg/ha)

Fumure de fond	1re série	2e série
P_2O_5	120	250
K_2O	300	400
Fumure annuelle		
N	250	250
P_2O_5	120	120
K_2O	250	250

(La fumure de fond a été mélangée au sol au moment du remplissage de chaque vase, l'azote a été fractionnée en quatre apports, après chaque coupe.)

Graminées utilisées

Lors de la première série d'essais de 3 ans, nous avons utilisé le dactyle « Floréal », la fétuque des prés « Séquana », la fétuque élevée « S 170 » et le ray grass anglais « Primevère ». Pour la seconde série d'essais, nous nous sommes intégrés à l'essai international nº 7 de la FAO (influence de l'altitude sur la croissance des plantes fourragères) et nous avons utilisé les variétés choisies par le groupe d'étude à savoir : le dactyle « Baraula », la fléole « Odenwaelder » et la fétuque des prés « Sequana » que nous utilisions déjà. Nous avons adopté l'exploitation « rythme pâture » avec une première coupe en début de montaison (stade 10 cm), suivie de coupes échelonnées (5-6 semaines).

Données climatiques

Les variables climatiques (température max. et min., évaporation Piche) ont été mesurées sur tous les sites à l'aide d'abris météorologiques simplifiés, de type AMPS. Pour la pluviométrie, nous avons profité de l'existence de postes officiels près des

* Le manque de moyens matériels ne nous a pas permis d'exploiter ces vases comme micro-lysimètres et d'étudier l'influence des fumures sur la composition des eaux de percolation.

trois premiers sites (St-Gilles, Luttenbach, Mittlach) et installé nos propres pluviomètres pour les deux sites d'altitude. Nous n'avons pas pu effectuer des mesures de rayonnement global ; nous possédons néanmoins les durées d'insolation du Centre de Colmar qui sont valables pour le site de St-Gilles, et celles du Sanatorium de l'Altenberg (Col de la Schlucht 1 150 m) qui s'appliquent à la crête des Vosges et au site du Rain. D'une manière générale l'insolation diminue en passant de St-Gilles à Mittlach (vallée encaissée).

Températures.

La figure 1 illustre les variations mensuelles des températures moyennes à Colmar (période 1895-1974), au Honeck (1 350 m) (1960-69) et sur les différents sites étudiés : St-Gilles-Luttenbach-Mittlach (1968-74), Schnepfenried-Rain (1971-74). L'écart de la

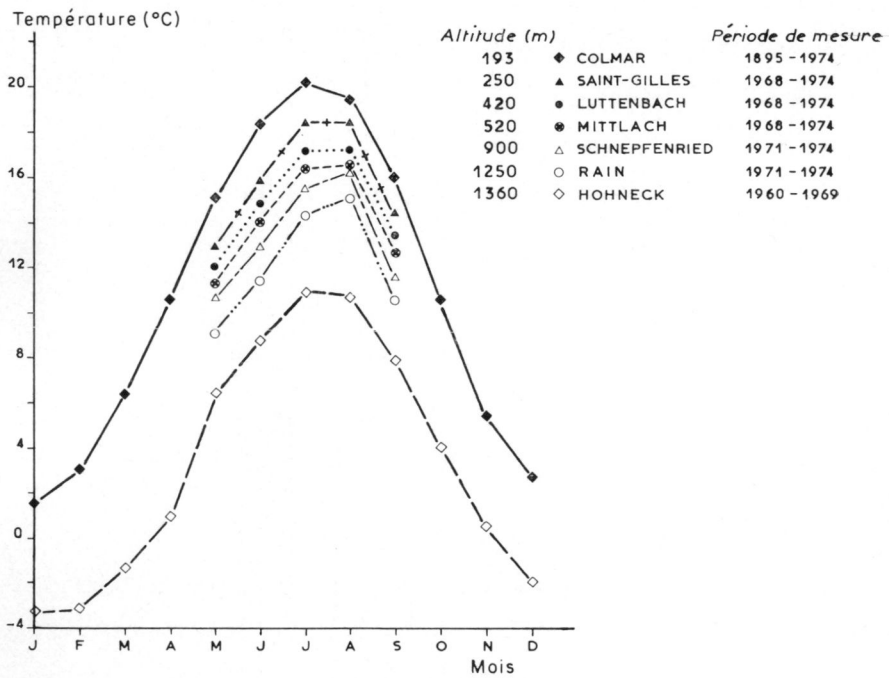


FIG. 1. — *Températures moyennes mensuelles.*
Mean monthly temperatures.

moyenne du mois le plus chaud avec celle du mois le plus froid est un élément important du climat ; ainsi cette amplitude est de 19° à Colmar (tendance continentale) et seulement de 14° sur les Hautes Chaumes où la tendance est océano-arctique. Au-dessus de 1 200 m, la tendance vers un climat polaire est très nette, il n'y a que 3 mois à température moyenne mensuelle supérieure à 10° (la limite naturelle de la forêt se situe vers 1 300 m), alors qu'au pied des Vosges il y a plus de 5 mois (7 mois à Colmar) (Shamsi, 1968).

Pluviométrie.

La figure 2 illustre pour la période 1960 à 1969 la pluviométrie des quelques stations retenues (St-Gilles, Luttenbach, Mittlach). Nous y avons joint la Station de l'Altenberg (Col de la Schlucht) qui fonctionne depuis 1966 et dont la moyenne pour la période 1966-74 et de 1 650 mm. Pour le site sommital du Rain nous ne possédons pas de valeurs sur l'ensemble de l'année. Néanmoins un pluviomètre totalisateur installé de 1921 à 1950, à moins de 2 km de distance, avait donné une moyenne de 1 900 mm. Ainsi la zone étudiée reçoit des précipitations de flux océanique et des orages de type continental. Cette transition d'un régime océanique HAEP vers un régime à tendance continentale EAPH s'effectue tout au long de la vallée de Munster.

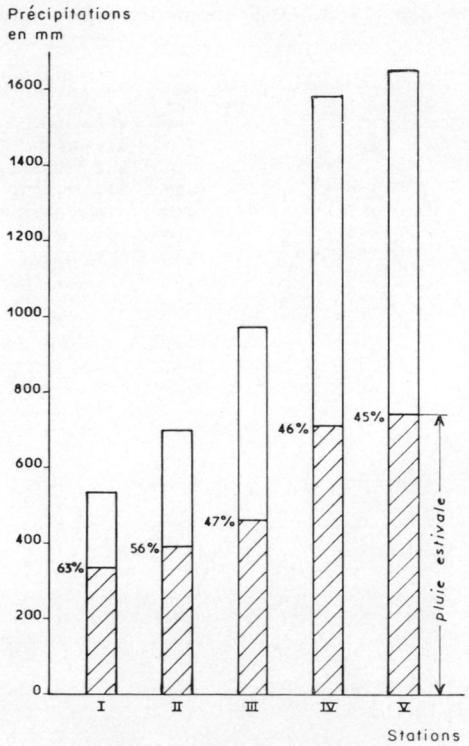


FIG. 2. *Pluviométrie* (1960-1969).

Pluviometry

I : Colmar (193 m) ; II : St-Gilles (250 m) ; III : Luttenbach (420 m) ;
IV : Mittlach (520 m) ; V : Col de la Schlucht (1 150 m)

Evapotranspiration potentielle ETP.

Différents auteurs (Robelin, 1967 ; Puech *et al.*, 1968) ont mis en évidence l'influence de l'alimentation hydrique sur la croissance des plantes et la relation quasi linéaire entre la production de matière végétale et la quantité d'eau évapotranspirée. Dans cette optique nous avons calculé ETP Bouchet, en vue d'établir des relations

rendements-déficits hydriques le long de notre chaîne de mesures. Sur les sites de St-Gilles et Luttenbach, les mesures furent effectuées pratiquement tous les jours d'où la possibilité d'un calcul quotidien d'ETP. Il n'en fut pas de même pour les trois autres sites, où nous n'avons pu relever les valeurs que tous les 3-4 jours. Nous disposions donc, sur ces sites, de valeurs Piche cumulées et des maximums et minimums de températures relatifs à ces laps de temps. Néanmoins la comparaison des températures des cinq sites et des relevés périodiques pour une même journée a permis un calcul approché de l'évapo-transpiration potentielle et du déficit hydrique (tabl. 3).

TABLEAU 3

Déficit hydrique : ETP-P mensuel

Période 1968-1974 (sites n° I à III) et 1971-1974 (sites n° I à V)

		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total des 5 mois (sur 7 ans)	Total des 5 mois (sur 4 ans)
I	min.	— 22	—117	59	— 35	— 15	83	83
St-Gilles	max.	45	71	99	163	115	396	396
250 m	MOY.	**14,6**	**2,0**	**83,5**	**49**	**58,7**	**217,4**	**290**
II	min.	— 45	— 85	—17	— 41	— 85	—141	— 5
Luttenbach	max.	46	— 9	104	85	65	172	172
420 m	MOY.	**— 4,1**	**— 34,1**	**39,3**	**12,1**	**10,4**	**18,3**	**74**
III	min.	—119	—164	— 49	—141	—171	— 466	— 220
Mittlach	max.	4	— 18	7	128	27	— 145	— 145
520 m	MOY.	**— 62**	**— 85,6**	**— 15,7**	**— 13,0**	**— 39,2**	**— 261,3**	**— 186**
IV	min.	— 96	—168	— 73	— 78	—127		— 287
Schnepfenried	max.	— 15	— 51	— 5	9	13		— 263
900 m	MOY.	**— 64,8**	**— 101,8**	**— 37,3**	**— 37,3**	**— 31,3**		**— 270,8**
V	min.	— 99	—180	— 95	— 89	—131		— 360
Rain	max.	— 24	— 82	2	0	17		— 298
1 250 m	MOY.	**— 65,8**	**— 122,5**	**— 55,5**	**— 55,8**	**— 31,8**		**— 320,8**

Indice climatique des potentialités agricoles de Turc

Nous avons voulu confronter les productions observées avec l'indice climatique de Turc, afin de voir dans quelles limites un tel indice global et de portée générale s'applique à un bassin versant qui se caractérise par de grandes variations de climat et d'altitude, et dans quelle mesure il est adapté pour traduire des variations de production au cours de l'année (corrélation avec les différentes coupes).

Cet indice CA fait intervenir trois facteurs :

— un facteur thermique $Ft = \frac{t(60 - t)}{1\,000} \cdot \frac{m - 1}{4}$;

— un facteur solaire Ft : égale à la plus petite des deux fonctions suivantes : $H - 5 - (\lambda/40)^2$, $0{,}03(lg - 100)$;

— un facteur sécheresse $Fs \leqslant 1$ qui tient compte de ETP et des besoins en eau d'irrigation à partir de la réserve disponible du sol (RU).

Sur prairie, Turc propose un nouveau facteur thermique qui tient compte du fait que les graminées peuvent encore photosynthétiser à des températures minimales nettement inférieures à 5°, l'ancien terme multiplicateur $\frac{m - 1}{4}$, valable pour les autres cultures, devient ainsi pour les prairies $\frac{m + 3}{4}$; autrement dit, il annule le facteur thermique (et l'indice) pour $m \leqslant -3$. On lui attribue la valeur 1 quand $m \geqslant 1°$ et, pour toutes les valeurs de m situées entre — 3° et + 1°, le terme multiplicateur varie de 0 à 1.

L'indice est calculé par mois, l'indice annuel étant la somme des douze indices mensuels (t est la température moyenne mensuelle, m la moyenne mensuelle des minimums, H la durée astronomique du jour du mois considéré (en h/j), λ la latitude en degrés et Ig le rayonnement global en cal/cm²/j.

Dans nos calculs nous avons utilisé ETP Bouchet disponible pour les cinq sites et pris comme réserve hydrique du sol, RU = 50 mm (eau disponible : $\Delta H = 10$ p. 100, densité apparente 1,4, profondeur 40 cm). Il convient de signaler que l'utilisation des vases réduit la quantité d'eau normalement disponible dans les différents sites, du fait de l'absence de remontée par diffusion. Dans les sites à pluviométrie élevée ces répercussions sont faibles, mais au niveau de St-Gilles, où l'on trouve des prairies sèches (*Xérobrometum*), la méthode de la culture en vase accentue les conditions d'aridité du milieu. D'une manière générale les indices des mois de janvier et février sont toujours nuls, de même que celui du mois de mars pour les deux sites d'altitude. Signalons qu'en montagne on peut avoir en avril et en mai des indices assez élevés, alors que la végétation est encore recouverte d'un épaix manteau de neige. Nous avons tenu compte de ces conditions en totalisant les indices à partir de la date de disparition de la neige. Le tableau 4 résume les indices de potentialités corrigés, calculés pour la période végétative (mars-octobre) des années d'essais.

Tableau 4

Indices des potentialités de Turc pour la période mars-octobre
Turc index of the potentialities for the period March-October

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	moy. 7 ans	moy. 4 ans
St-Gilles	28,3	23,2	23,8	13,2	26,1	17,6	11,7	20,5	17,2
Luttenbach	31,2	31,9	29,4	21,4	25,6	25,3	27,4	26,5	24,9
Mittlach	30,1	30,6	27,3	27,9	25,2	28,0	29,5	28,4	27,7
Schnepfenried				26,3	23,8	25,5	26,5		25,5
Rain				25,0	20,7	24,7	23,4		23,5

Dépouillement statistique.

Les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse de variance ainsi que d'un calcul de corrélation simple. Dans le cas des faibles effectifs de paires de données, nous avons utilisé la corrélation non paramétrique de rang (Spearman).

* Nous n'avons pas voulu recourir au calcul d'ETP Turc qui fait entrer en jeu l'ensoleillement dont les variations sont mal connues le long de la chaîne climatique.

TABLEAU 5

Moyennes des rendements en MS q/ha, *et comparaisons des espèces et des rendements*

Means of yield (DM q/ha) *and species and yields comparison*

		Ray Grass (Primevère)	Fétuque des prés (Sequana)	Fétuque élevée (S 170)	Dactyle (Floréal)	Comparaisons entre espèces	
						Signification globale	CV p. 100
St Gilles 250 m	1968	24,0	48,9	43,9	51,1	HS	11,9
	69	27,3	64,4	64,7	68,4	HS	13,8
	70	45,9	45,0	53,4	48,7	NS	10,7
Luttenbach 420 m	1968	64,7	68,1	55,4	64,0	NS	10,3
	69	63,1	77,0	94,1	87,6	HS	9,1
	70	60,7	41,5	65,3	57,6	S	12,6
Mittlach 520 m	1968	67,9	78,1	70,7	76,7	S	5,7
	69	50,5	71,7	73,1	76,7	HS	14,6
	70	35,1	38,1	42,0	43,9	NS	12,5
		Comparaison entre sites					
Signification globale	68	HS	HS	HS	HS		
	69	HS	S	HS	HS		
	70	HS	NS	HS	S		
CV p. 100	68	4,4	6,6	6,5	4,0		
	69	15,5	12,1	12,6	4,5		
	70	18,4	7,7	5,7	10,9		

C. — Exposé des résultats

Les principaux résultats (rendements moyens en q/ha* et comparaison entre espèces, sites et années, accompagnés des seuils de signification statistique) sont portés sur les tableaux 5 et 6 et la figure 3 illustre les rendements par espèces et par sites des essais 1971-74.

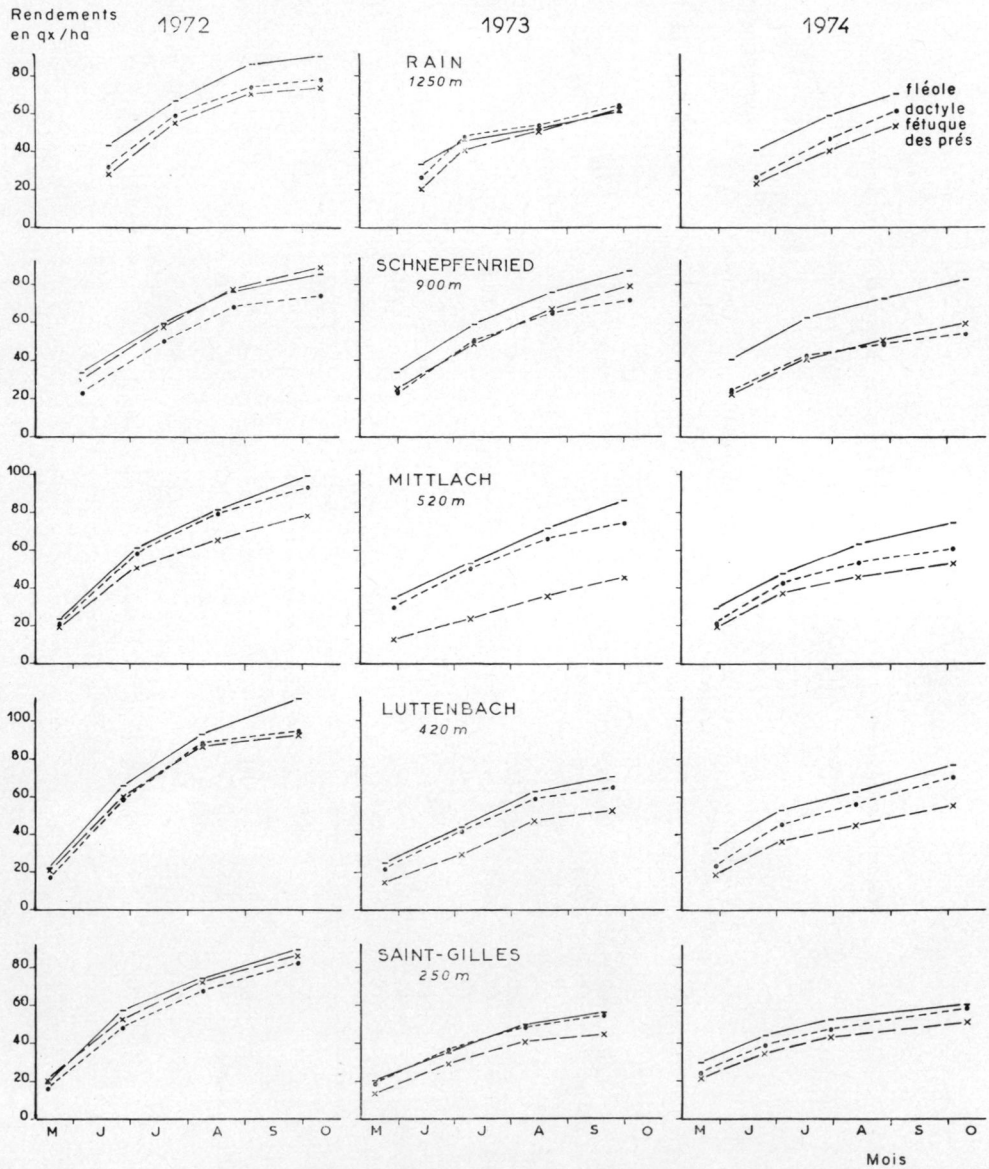


FIG. 3. — *Rendement annuels en q/MS/ha par espèce, site et année.*
Annual yields (q/ha) *by species, sites and year.*

* Nous avons transformé les rendements initiaux g/vase en q/ha afin de mieux illustrer les potentialités climatiques.

TABLEAU 6

Moyennes des rendements en MS q/ha, *et comparaison des espèces et des sites*

Means of yields and species and sites comparison (DM q/ha)

		Fétuque des prés (Séquana)				Fléole (Odenwaelder)				Dactyle (Baraula)				Comparaison entre espèces			
														Signification globale			
St-Gilles 250 m	1971	46,6				48,6				51,3				NS			
	72		86,9				89,3				82,4				NS		
	73			44,8				56,0				55,2				S	
	74				51,2				60,4				59,4				NS
Luttenbach 420 m	1971	60,3				55,7				60,7				NS			
	72		102,3				111,3				103,5				NS		
	73			53,1				70,3				65,2				HS	
	74				54,0				77,6				70,6				HS
Mittlach 520 m	1971	58,9				47,7				55,4				NS			
	72		77,9				99,0				93,0				S		
	73			45,3				86,0				74,9				HS	
	74				53,4				74,2				60,4				S
Schnepfenried 900 m	1971	49,4				37,8				38,0				NS			
	72		88,5				85,4				73,5				NS		
	73			79,5				87,4				71,3				S	
	74				59,3				82,0				53,9				HS
Rain 1 250 m	1971	15,9				21,9				20,4				S			
	72		73,4				89,9				77,4				NS		
	73			62,1				61,2				63,3				NS	
	74				52,6				72,9				61,9				HS

	Comparaison entre sites											
	1971	72	73	74	1971	72	73	74	1971	72	73	74
Signification globale	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	S	HS	HS	S	S
CV p. 100	16,5	8,9	15,4	8,1	9,8	8,3	7,8	11,0	16,1	9,6	11,2	14,0

Comparaison entre espèces					
CV p. 100					
13,7					
	5,9				
		8,5			
			8,8		
8,5					
	4,5				
		4,7			
			6,8		
10,8					
	8,7				
		6,9			
			14,2		
17,8					
	10,6				
		7,7			
			10,9		
13,6					
	11,6				
		9,4			
			7,8		

1. — *Comparaison entre espèces. Rendements en MS*

a) *Première série d'essais* 1968-70.

Les comparaisons entre espèces sont en général significatives (S) ou hautement significatives (HS) sauf l'année 1970 qui se caractérise par une production assez faible (présence d'une couverture de neige jusqu'à la fin avril au fond de la vallée. On constate les faibles possibilités du ray grass anglais en milieu sec qui a favorisé davantage le dactyle (racines bisanuelles) que la fétuque élevée, espèce pourtant réputée très résistante à la sécheresse. Sur le site de Luttenbach (420 m) bien arrosé, mais bénéficiant également d'un bon ensoleillement, la fétuque élevée domine significativement le dactyle et la fétuque des prés.

b) *Deuxième série d'essais* 1971-1974.

D'une manière générale on peut dire que la fléole se tient systématiquement en tête même sur le site sec de St-Gilles (250 m). Le dactyle prend la seconde place, sauf au Schnepfenried (900 m), où il est remplacé par la fétuque des prés, qui partout ailleurs, produit le moins et ceci d'une manière significative et même hautement significative par rapport à la fléole.

2. — *Comparaison entre sites*

2.1. *Essai* 1 : 1968-1970.

Toutes les espèces expérimentées (ray grass, dactyle, fétuques) permettent de différencier les trois sites entre eux ; la comparaison est hautement significative sauf si elle se fonde sur les rendements de la fétuque des prés (tabl. 5). D'une manière générale la productivité augmente avec les disponibilités hydriques. Néanmoins c'est le site intermédiaire de Luttenbach qui se place en tête, ce qui s'explique si l'on tient compte de la complémentarité des facteurs de production. En effet, au-delà d'un certain niveau d'alimentation hydrique, le facteur eau n'est plus limitant et c'est l'ensoleillement qui optimise la production. A Mittlach (fond de la vallée) le rayonnement solaire direct est intercepté par la montagne en début et en fin de journée ; quant au rayonnement diffus, il est diminué d'une manière quasi permanente.

2.2. *Essai* 2 : 1971-1974.

Le tableau 6 montre que les cinq sites se différencient assez bien les uns des autres, même l'année d'implantation de l'essai (1971). Les comparaisons pour les années 1972 et 1973 sont hautement significatives quelle que soit la graminée de référence (sauf dans le cas du dactyle où la comparaison de 1973 n'est significative qu'au seuil de 5 p. 100). Quant à l'année 1974, seule la fléole permet une comparaison significative.

En vue d'une appréciation plus globale des sites sur l'ensemble de la durée de l'essai, nous avons effectué une comparaison statistique des moyennes, sur 3 années, des rendements annuels de chaque vase (répétitions) et pour chaque espèce (traitements). Le tableau 7 regroupe les rendements moyens ainsi que les seuils de signification relatifs aux deux comparaisons (espèces, sites). Les espèces présentées par ordre

TABLEAU 7

Comparaison globale sur les moyennes de rendements, en MS q/ha. *Total comparison on the mean yields*

	Fétuque des prés (Séquana)	Fléole (Odenwaelder)	Dactyle (Baraula)	Comparaison entre espèces	
				Signification	CV p. 100
St-Gilles 250 m	60,6	68,6	65,6	S	5,2
Luttenbach 420 m ...	69,7	86,4	79,8	S	7,6
Mittlach 520 m	58,4	86,4	76,3	HS	9,6
Schnepfenried 900 m..	75,7	84,9	66,2	HS	7,7
Rain 1 250 m	62,7	74,6	67,1	HS	5,6
	Comparaison entre sites				
Signification	S	HS	S		
CV p. 100	11,5	6,4	8,1		

de rendement décroissant fournissent le classement suivant : (le signe $>$ ou $\gg$ précisant que les différences sont significatives ou hautement significatives).

Luttenbach	: fléole		dactyle		fétuque des prés
Mittlach	: fléole		dactyle	$>$	fétuque des prés
Schnepfenried	: fléole	$>$	dactyle	$\gg$	fétuque des prés
Rain	: fléole	$\gg$	dactyle	$>$	fétuque des prés
St-Gilles	: fléole		dactyle		fétuque des prés

Au niveau des rendements, la comparaison des sites est hautement significative pour la fléole et significative pour le dactyle. La fétuque des prés par contre n'a pas permis une comparaison globale significative (fluctuation intervases trop grande). En exprimant « l'effet site » par la moyenne générale des rendements M.S. des trois espèces confondues et en attribuant au site le moins productif l'indice 100, nous obtenons le classement suivant :

1	Luttenbach	121	420 m
2	Schnepfenried	116,1	900 m
3	Mittlach	113,4	520 m
4	Rain	104,7	1 250 m
5	St-Gilles	100	250 m

2.3. *Rendement protéique.*

Les rendements de matière sèche ne renseignent qu'imparfaitement sur la valeur fourragère qui dépend non seulement du rythme d'exploitation mais également des conditions climatiques du lieu d'implantation. Si nous effectuons une comparaison des sites sur la base du rendement en matières azotées digestibles (MAD), nous obtenons le classement indiciaire suivant :

St-Gilles	119,2
Rain	113,8
Luttenbach, Schnepfenried	101,4
Mittlach	100

C'est le site le plus sec (et le plus chaud) qui fournit les meilleurs rendements en MAD, suivi du site le plus élevé, alors que le site le plus encaissé (Mittlach) produit la qualité la moins bonne.

D. — Discussion des résultats et considérations agronomiques

1. — *Phénologie et calendrier d'exploitation*

On sait que l'interaction des facteurs écologiques imprime à la plante un rythme de croissance et de développement qui dépend du régime thermique, de la photopériode et des facteurs trophiques. Pour chiffrer l'influence du site sur la précocité, nous avons relevé sur des placettes témoins les dates d'épiaison des trois graminées, ce stade servant de repère phénologique. A partir des observations des trois espèces sur 3 années, le retard moyen était de 43 jours entre le site de St-Gilles (épiaison entre le 20-25 mai) et le site sommital de Rain (épiaison première décade de juillet). L'exploitation de chaque espèce à un même stade (10 cm) n'ayant pu être réalisée, nous avons choisi une date de coupe moyenne : ainsi les premières coupes ont été effectuées entre le 15 et le 20 mai à St-Gilles, entre le 19 et le 27 mai à Luttenbach, entre le 23 et le 29 mai à Mittlach, entre le 1er et le 7 juin au Schnepfenried et entre le 15 et le 20 juin au Rain. Il y a donc eu, en moyenne, 33 jours de décalage entre la première coupe à l'entrée de la vallée de Munster et celle sur les Hautes Chaumes. Cette différence de 10 jours entre les précocités des sites (à partir des dates d'épiaison) et les dates effectives d'exploitation est due, en partie, à une certaine imprécision dans l'appréciation du stade « 10 cm », mais aussi à une différence dans le rythme de croissance des graminées selon leur mode d'exploitation (quatre coupes sur les graminées exploitées en rythme pâture, une seule coupe sur les plantes ayant servi comme repère phénologique). Ces divergences sont en fin de compte secondaires. Ce qui importe, c'est le fait que les données recueillies permettent la réalisation d'un double calendrier d'exploitation, un calendrier « fauche » (foin-regain) sur la base du calendrier phénologique et un calendrier « pâture » sur la base des dates définies par l'expérience. Ces calendriers sont applicables aussi bien au niveau d'une exploitation que, dans une optique de développement, au niveau des zones situées dans des conditions climatiques voisines de celles de notre chaîne de mesure, c'est-à-dire dans les autres vallées vosgiennes.

2. — *Les liaisons rendements-facteurs climatiques*

On sait que la production de matière sèche d'une plante varie en fonction de son alimentation hydrique et nous avons voulu voir comment se présente la liaison entre le rendement et le gradient pluviométrique de la vallée. Les données climatiques re-

cueillies montrent que les deux premières coupes d'une exploitation pâture se réalisent dans de bonnes conditions d'alimentation en eau (Fauché et de Montard, 1975). La détermination de l'importance de ces deux coupes exprimée en p. 100 de la production totale de l'année permet de dire qu'il existe dans la vallée de Munster une zone climatique intermédiaire (au niveau de Luttenbach) où la contribution de ces deux coupes est la moins élevée et où la production estivale et d'arrière saison est encore importante (environ 40 p. 100). Lorsqu'on se rapproche du noyau de sécheresse de Colmar, ou que l'on s'élève en altitude, la contribution des deux premières coupes augmente. Dans le Massif Vosgien, la deuxième coupe s'effectue en général durant la deuxième décade de juillet au niveau de l'étage de la hêtraie-sapinière (représentée par le site du Schnepfenried) et durant la troisième décade de juillet sur les Hautes-Chaumes et dans l'étage de la hêtraie d'altitude. L'expérimentation a montré que, sur ces deux sites montagnards, la production automnale ne représentait plus, respectivement, que 31 et 27 p. 100 du total. On retrouve ici le principal problème agronomique auquel sont confrontés les agriculteurs qui exploitent les landes sommitales des « ballons » vosgiens (environ 4 000 ha), et qui doivent pallier cette baisse de production herbagère dont la répercution sur la production laitière devient importante à partir du mois d'août (Mettauer, 1976).

Dans la zone la plus sèche (début de la vallée de Munster) où la production moyenne calculée des deux premières coupes était de 64,7 p. 100, l'option fourragère nécessite la recherche d'un rendement maximum du premier cycle d'exploitation grâce à une politique de fumure intensive, la production estivale ou d'arrière saison étant souvent limitée par la sécheresse.

Cette limitation climatique de la production herbagère rejoint celle décrite par Klapp (1956) qui note, que pour une pluviométrie inférieure à 750 mm, la croissance régulière et continue des plantes prairiales au cours de l'année s'avère impossible sans apport d'eau complémentaire (nappe, irrigation).

La figure 4 illustre les rendements annuels (moyennes des 3 années) des différents sites caractérisés par leur bilan hydrique calculé (ETP-P). Un essai de mise en évidence des corrélations entre les rendements des différentes coupes des trois espèces et les

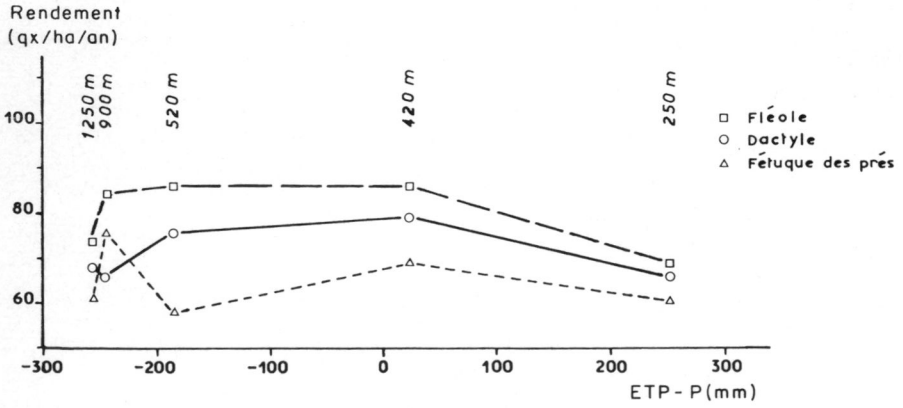


FIG. 4. — *Rendement moyen annuel par espèce, site et ETP-P.*
Mean annual yields by species, site and ETP-P.

bilans hydriques correspondants calculés sur les cinq sites donne les équations de régression suivantes (cinquante-neuf données) :

Fléole	Rendement = — 0,43 (ETP-P) + 19,1	(R = 0,33)
Dactyle	Rendement = — 0,34 (ETP-P) + 17,9	(R = 0,31)
Fétuque des prés	Rendement = — 0,35 (ETP-P) + 15,5	(R = 0,36)

Malgré les faibles coefficients R, ces équations confirment la relation négative entre rendement et déficit hydrique. Quant à la constante, elle donne une idée du rendement moyen par coupe (en MSq/ha) de chaque espèce dans la zone climatique où le déficit hydrique est nul. Cette zone se situe à hauteur de Luttenbach et s'étend jusqu'à l'aval de Munster.

La relation linéaire avec ETP-P n'apparaît clairement que dans la zone située entre St-Gilles (250 m) et Luttenbach (420 m) qui se caractérise par un déficit hydrique réel. Les trois autres sites présentent un excès d'eau important dont l'effet sur la productivité est minime. Il y a aussi compensation entre sécheresse et longueur de la période végétative. Si l'on s'élève en altitude, l'intensité de la sécheresse diminue, mais la durée de la saison estivale aussi, si bien que la quantité d'eau évapotranspirée (ETR) ne varie pas tellement d'un site à l'autre.

3. — *Relations rendement-indice des potentialités agricoles de Turc (CA)*

Les résultats trop peu nombreux ne permettent pas l'utilisation du test de corrélation de Pearson, ce qui nous a conduit à utiliser le test non paramétrique de Spearman applicable au traitement des faibles effectifs.

3.1. *Rendement global-indice CA global.*

La figure 5 illustre pour chaque site les relations entre le rendement moyen (sur 3 ans) de chaque espèce et l'indice CA moyen correspondant *. Le classement des

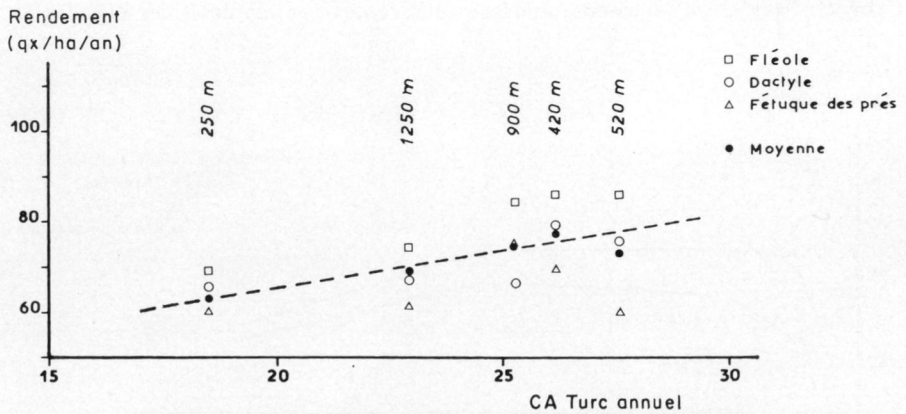


FIG. 5. — *Relation rendement moyen-indice CA Turc moyen.*
Relation : mean yield-mean index CA Turc.

* Avec ETP calculé selon la formule de Bouchet.

sites selon leurs potentialités climatiques, caractérisées à l'aide de l'indice CA, confirme sensiblement celui qui résulte de l'expérimentation (le coefficient de corrélation de rang $r_s = 0,97$). Signalons ici que la réponse spécifique dépend fortement des caractéristiques génétiques.

3.2. *Production moyenne journalière-indice CA moyen journalier.*

La figure 6 représente la relation rendement (moyennes *des meilleurs rendements* individuels des pots sur les 3 années) indice moyen journalier pour les coupes 1, 2 et 3. Seule la première coupe a donné une corrélation de rang (Spearman) significative ($r_s = 0,9$) ; pour la seconde coupe, la corrélation est à la limite de la signification et, au niveau de la troisième, elle n'apparaît plus. L'expression de l'influence climatique est perturbée par la physiologie de la plante, mais sans doute aussi par une légère insuffisance des apports azotés, ou par une trop grande différence dans les dates de la troisième coupe.

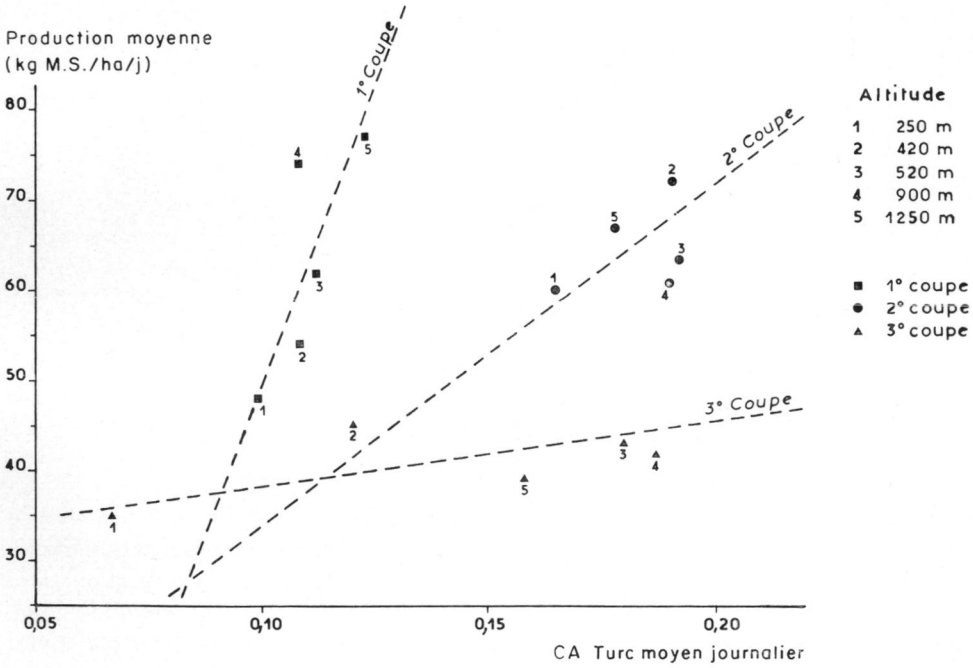


FIG. 6. — *Relations production moyenne journalière-indice CA journalier.*
Relations mean daily production-daily index CA.

E. — Conclusions

L'étude des prairies permanentes du Massif Vosgien a été entreprise dans l'optique d'une meilleure connaissance du comportement des plantes prairiales vis-à-vis des facteurs du milieu. Du fait de l'orientation Nord-Sud du Massif, le versant alsacien et les vallées correspondantes se caractérisent par un gradient pluviométrique important.

L'existence de ce gradient nous a conduit à étudier dans quelle mesure la productivité des plantes herbacées dépendait du climat local qui définit « l'ambiance » dans laquelle croît et se développe leur partie aérienne. Pour ce faire, nous avons mis en place le long du bassin versant de la principale vallée vosgienne (Vallée de Munster) une chaîne de cinq sites au niveau desquels nous avons effectué des semis de graminées en vases enterrés. La réponse globale des espèces utilisées permettait ainsi de comparer les conditions climatiques des différentes stations en tant que facteurs de production. Le schéma (fig. 7) résume la situation géographique et climatique de l'ensemble des cinq stations.

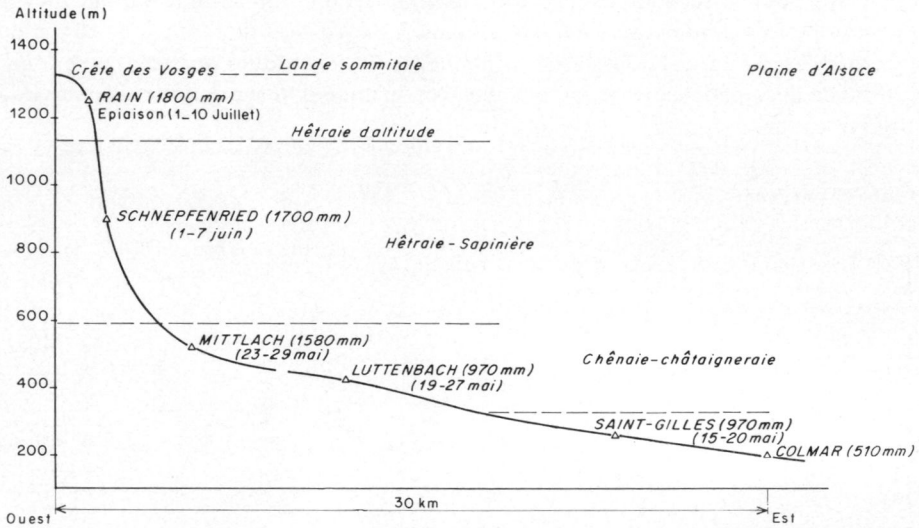


FIG. 7. — *Situation géographique et climatique des sites étudiés.*
Geographic and climatic situation of the studied sites.

Compte tenu des principaux résultats obtenus, on peut dire que la vallée étudiée (Munster) présente trois grandes zones climatiques : la première, la plus sèche, caractérisée par le site de St-Gilles, pénètre sur environ 3-4 km dans la vallée et pénalise assez fortement la production fourragère. La seconde (site du Rain) englobe l'étage de la lande sommitale et celui de la hêtraie d'altitude (entre 1 100 et 1 400 m d'altitude) dont la superficie exploitable en herbe est d'environ 5 000 ha. Dans cette zone la pluviométrie est largement excédentaire, mais le facteur limitant est la température qui réduit fortement la durée de la période végétative. Entre ces deux extrêmes, se situe la zone climatique aux potentialités les plus élevées qui correspond à l'étage de la hêtraie-sapinière. Elle se caractérise par une alimentation en eau non limitante et par une luminosité et des températures encore fortes (sites de Luttenbach, Mittlach et Schnepfenried).

La chaîne de mesures réalisée a également permis de classer ces différentes zones quant à leur précocité respective. Le décalage moyen entre l'entrée de la vallée et les Hautes Chaumes est ainsi de l'ordre de 40 jours. Nous avons enfin pu définir un double calendrier d'exploitation, l'un relatif au système fauche sur la base de repères

phénologiques (date d'épiaison), l'autre relatif au système pâture sur la base des résultats expérimentaux. Ces différentes données peuvent aussi se traduire en terme de souplesse d'exploitation des prairies selon les différents objectifs des agriculteurs, qui peuvent nécessiter une modulation de la fumure azotée en fonction des besoins d'un troupeau et du potentiel climatique de chaque saison (limitation de la durée de végétation soit par le froid (Rain), soit par la sécheresse (St-Gilles)).

Ces données sont également applicables à la majorité des vallées vosgiennes dont la caractérisation à l'aide de l'indice de Turc peut être envisager à peu de frais.

Mais toutes ces acquisitions techniques ne représentent qu'un des volets du problème très complexe de l'Economie montagnarde, qu'il serait d'ailleurs erroné de traiter sous le seul aspect de l'agriculture. Les perspectives d'avenir et les actions futures à mettre en œuvre au plan agricole devront s'intégrer à une politique générale en matière d'aménagement du territoire et de l'environnement, et tenir compte de l'ensemble des activités économiques du Massif.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Summary

Contribution to the study of the climatic potentialities of the Vosgian Mountain

The study of the permanent grasslands of the Vosges Mountains has been entered upon in ordre to get a better knowledge of the condition of the meadow-plants with regard to the environment factors. Owing to the North-Sowth orientation of the Massif, the Alsatian side and the corresponding valleys are distinguished by an important pluviometric gradient. In less than thirty km you pass from a semi-continental climate with 600 mm rain to an atlantic mountain inclined climate with a 2 000 mm pluviometry. The existence of this gradient led the author to study to what extent the productivity of the herbaceous plants was depending on the climate. To this end he specified the potentialities of the main climatic zones on the basis of temperature measures (max. and min.) potential evapotranspiration (Bouchet) and climatic index of agricultural potentiality (Turc) on the one hand and on the other hand on the basis of the yield study of some very productive graminaceae in proportion of these climatic factors.

Along the catchment aera of the main Vosges valley (valley of Munster) the author chose five sites which are typical of the various layers of vegetation and at this level he made sowings in sunten vases on the same substratum and with the same manure (non restricting). The effect due to the heterogeneity of the natural soils being thus excluded, the global response of the graminaceae allowed the comparison of the climatic conditions of the various stations as a factor of production.

The results the author obtained in the studied valley enable him to make the following statements :

— Among the various graminaceae he tested, phleum appeared to be the best adapted to the Vosges remaining ahead everywhere even in the less watered site.

— The classification of the climatic potentialities of the various sites was possible by referring to the yields of phleum and dactylis. This classification corroborates perceptibly the one obtained from the index of the Turc potentialities.

— Three climatic zones have been distinguished : one which is relatively dry, penetrates into the valley on about 4 km ; another one includes the whole mountain the heigh of which above 1 100 m (about 5 000 ha pasture land) and distinguishes itself by a pluviometric excess and restricting summer temperatures. The third one is located between the two former and presents the highest climatic potentialities (non restricting rain and temperature).

— There is a 40 day shift of precocity between the beginning of the valley and the heath at the summit and we have been able to define a twofold calendar of exploitation : one connected with the mow system on the basis of phenological guidemarks (eartime), the other relative to the pasture system on the basis of experimental results.

— The calculation of the simple regressions between yield and ETP-P at the level of the different sections allowed the setting up of equations which point out the negative relation (significant to 1 p. 100) between yields and the corresponding hydrous deficits. As to the relation from the average daily production to the medium daily Turc index, a good rank correlation (Spearman) at the first cutting level and an almost significant correlation at the level of the second cutting have appeared.

The results are for the most part transposable to the other valleys of the Vosges.

Zusammenfassung

Beitrag zur Untersuchung der klimatischbedingten Ertragsmöglichkeiten des Vogesen Massifs

Die Wiesen- und Weidenflächen der Vogesen wurden im Rahmen einer besseren Kenntniss des Pflanzenverhaltens im Zusammenhang mit den Standortsfaktoren untersucht. Das Versuchsobjectiv war die Bestimmung der klimatischbedingten Ertragsmöglichkeiten der verschiedenen Vegetationstufen. Die Charakterisierung wurde folgendermassen durchgeführt : Ertragsmessung von verschiedenen Grässersorten im Zussammenhang mit den klimatischen Bedingungen (Temperatur, Niederschläge, Evapotranspirationrate : ETP Bouchet, und landwirtschaftlicher Ertragsindex von Turc). Die Versuchskette wurde im Münstertal auf 5 typischen Standorten angelegt mittels Gefässversuchen (Lysimeter mit einem auf dieselbe Art gedüngten Granitboden angefüllt).

Folgende Ergebnisse wurden erziehlt :

— Unter den angewandten Versuchsgrässer hat sich Phleum pratense am besten bewährt, sogar auf dem trockensten Standort.

— Eine klassifizierung der verschiedenen Vegetationstufen, hinsichtlich ihren klimatischbedingten Ertragsmöglichkeiten hat sich auf Grund der erzielten Erträge von Phleum and Dactylis ergeben Diese Rangordnung bestätigte die welche durch den Klima index von Turc ausgerechnet worden war.

— Drei Ertragszonen, welche teils durch eine ungünstige Wasserbilanz, teils durch einen Temperaturdefizit begrenzt waren, konnten beschrieben werden.

— Die Zeitspanne für ein gleiches Wachstumstadium beträgt zwischen dem Eingang des Tales und den Höchstlagen 40 Tage. Ein doppelter Nutzungskalender wurde angegeben (Grassnutzung und Weidenutzung).

— Die negative Korrelation zwischen Ertrag und Wasserdefizit war signifikant.

— Die meisten Schlussfolgerungen sind auf die anderen Vogesentälern übertragbar.

РЕЗЮМЕ

Контрибуция к изучению климатических потенциальностей массива вогез.

МЕТОЭР Г.

Чтобы охарактеризовать климатические потенчиальности растительности на разных высотах Массива Вогез, изучалась продуктивность некоторых селекционированных сортов злаковых, посеянных в закопанные в почву разных местностей сосуды, содержавшие один и тот-же субстрат и получавшие одинаковое, превышающее нужды удобрение.

Общий ответ тестированных растений позволил, таким образом, сравнить влияние климатических условий разных местностей, на продуктивность. Полученные результаты показали возможность классификации этого порядка, в случае принятия урожаев тимофеевки и ежи в качестве референции. Полученная классификация приблизительно совпадает с классификацией составленной на базе сельскохозяйственной потенциальности Тюрка.

Опыт этот позволил выделить три главных климатических зоны, высоко потенциальную промежуточную, и окружающие ее две другие, в каждой из которых играл роль какой-то ограничивающий фактор : засушливость - в выходах в долины, и низкая температура - в горной зоне.

Составлен был также двойной календарь ведения хозяйства : первый - на базе фенологических ориентиров, для укосов, и второй - основанный на экспериментальных результатах, для выпасов.

Кроме того выявлено было отрицательное соотношение между урожайностью и водным дефицитом.

Полученные результаты транспонируются на большинство из Вогезских долин.

Références bibliographiques

CAPUTA J., 1969. Potentialités fourragères en zone de montagne. *Fourrages*, **38,** 89-109.

CAPUTA J., SCHECHTNER G., 1970. Wachstumsrythmus und Stickstoffwirkung auf natürlichen Beständen der Bergweiden. *Futter* B 16, H 3, 165-182.

DROUINEAU G., 1963. Recherche Agronomique et mise en valeur. *Bull. Techn. Inf.*, **185,** 705-709.

FAUCHÉ J., DE MONTARD F., 1975. Potentialités des prairies permanentes dans le Haut-Limousin. *Fourrages*, **63,** 61-106.

FÉLIX L., RAUZY G., 1971. Contribution à la prévision de la production de plantes cultivées au moyen d'un indice agro-climatique local. *Fourrages*, **45,** 71-92.

HÉDIN L., KERGUELEN M., 1963. L'évaluation des ressources fourragères et l'intensification en région de montagne. *Fourrages*, **13,** 23-47.

HÉNIN S., 1953. Pédologie et fertilisation. *Bull. techn. Inf.*, **81,** 463-468.

KLAPP E., 1956. *Wiesen und Weiden.* Ed. Paul Parrey, Berlin, 520 p.

KÖNEKAMP A. H., BLATTMANN N., WEISE F., GUTHMANN A., 1959. Erträge deutscher Sauerweiden. *Boden und Planzen*, **7**, 102 p.

LAMBERT J., TOUSSAINT B., 1973. Influence des conditions climatiques sur la réponse à la fumure azotée de quelques espèces et variétés de graminées fourragères. *Fourrages*, **53,** 23-45.

LANGLET A., 1971. Essai de prévision de l'orientation de la production agricole dans diverses régions naturelles en fonction des facteurs écologiques. *Ann. agron.*, **22** (4), 425-449.

LANGLET A., VIARD R., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de productions des principaux milieux naturels de la région Midi-Pyrénées. II. L'utilisation des références disponibles. *C. R. Acad. Agric.*, 723-729.

LANGLET A., BLANCHET R., FIORAMONTI S., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de production des principaux milieux naturels de la région Midi-Pyrénées. I. Méthodes d'études. *C. R. Acad. Agric.*, 714-722.

METTAUER H., 1970. *Contribution à l'étude de l'Ecologie des prairies permanentes en Alsace.* C. R. Chambre Régionale d'Agriculture, 30 p.

METTAUER H., 1976. Réflexions sur les potentialités et l'exploitation des prairies de la montagne vosgienne. *Bull. Soc. Hist. Nat. Colmar*, 151-160.

PUECH J., MAERTENS S., FIORAMONTI S., MARTY J. C., COUREAU M., 1968. Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées. *Ann. Agron.*, **19** (3), 365-377.

ROBELIN M., 1969. L'alimentation en eau des plantes fourragères. *Fourrages*, **38,** 30-40.

SHAMSI F., 1968. *Les climats de la France de l'Est* (thèse de 3e cycle). ULP Strasbourg, 258 p.

TALAMUCCI P., 1976. Potentialités fourragères des terres en friche de la montagne toscane. *Congrès F.A.O.* Nyon 10 p., *Groupe d'étude des herbages de montagne.*

TURC L., 1967. Incidences des facteurs microclimatiques sur les productions végétales. *Fourrages*, **31,** 10-35.

TURC L., 1972. Indice climatique de potentialité agricole. *Science Sol*, **2,** 81-101.

Ann. agron., 1978, **29** (6), 625-640.

Etude intravariétale des relations entre le rendement par épi et les caractères morphologiques chez le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) : relations morphologiques à la floraison

J.-F. LEDENT*

avec la collaboration technique de Marie-Pierre LEDENT, Marie-France JOURET et Thérèse BELLEFONTAINE

Université Catholique de Louvain
Laboratoire d'Ecologie Végétale
Place Croix-du-Sud, 4 B- 1348 *Louvain-la-Neuve Belgique*

Résumé

Les relations qui existent à la floraison, entre le poids sec de l'épi ou le nombre d'épillets d'une part, et toute une série de caractères morphologiques d'autre part sont envisagées chez trois cultivars de blé d'hiver (Cama, Maris Nimrod et Norda) et étudiées en détail par différentes méthodes d'analyse statistique.

Des talles normalement développées, choisies au hasard dans des parcelles de plein champ, font l'objet de ces observations. Les caractères mesurés concernent les poids secs et les dimensions (longueur, largeur ou surface) des divers organes (feuilles, gaines foliaires, portions de tige) ; on tient compte également du volume de l'épi, du nombre et de la densité des nervures sur les limbes foliaires.

Les surfaces des deuxième ou troisième feuilles à partir du sommet sont plus étroitement liées au poids de l'épi et au nombre d'épillets que la surface des feuilles sommitales. Le poids sec total de la talle (sans épi), — et non sa longueur —, celui de la dernière gaine et la « masse surfacique » (specific leaf weight) des feuilles sommitales apparaissent comme les caractères les mieux liés à l'épi (poids sec, ou volume). Le nombre ou la densité des nervures ne semble pas représenter des critères fort significatifs.

Introduction

Cette étude constitue le second volet d'un travail consacré à l'étude des relations entre caractères morphologiques et rendement par épi. Dans la première partie (Ledent, 1977*a*), nous avions étudié les relations que l'on peut observer à la maturité complète. Cette étude avait mis en évidence l'importance de la période déterminant le nombre de grains par épillet et, dans une moindre mesure, le nombre d'épillets fertiles. En effet, la composante la plus importante du rendement était le nombre de

* Chargé de Recherches FNRS. Une partie de cette étude fut effectuée alors que l'auteur disposait d'une bourse de recherches de l'IRSIA.

grains par épi, et plus précisément, le nombre de grains par épillet. En outre, les deuxième et troisième feuilles (à partir du sommet) apparaissaient plus liées au rendement par épi que la feuille sommitale. Il nous semblait donc que la période de formation de l'épi précédant la floraison méritait d'être étudiée en détail.

Si le remplissage du grain est déterminé essentiellement après la floraison et ne peut être vraiment observé qu'à la maturité, les caractères liés au développement de l'épi (taille, volume, nombre d'épillets) peuvent être observés dès la floraison. En outre, à la floraison, on peut étudier une série de caractères morphologiques importants, non observables à la maturité. Il s'agit des surfaces foliaires, du nombre de nervures, des « masses surfaciques » (poids sec foliaire par unité de surface foliaire).

Nous avons donc abordé dans ce second volet le problème des relations entre la taille (poids sec ou volume) de l'épi et le nombre d'épillets d'une part, et les caractères morphologiques de la talle qui les porte d'autre part.

Matériel et méthodes

I. — *Matériel et caractères mesurés*

Les essais ont été effectués en plein champ en 1974.

Le matériel, l'échantillonnage et les méthodes statistiques utilisées ont été décrits dans la première partie de cette étude (Ledent, 1977*a*). Nous nous contenterons de rappeler que trois cultivars ont fait l'objet de mesures : Cama (obtenu à la Station de Sélection de Gembloux, Belgique) ; Norda (obtenu à la Station de Sélection d'Heverlee) et Maris Nimrod (obtenu par le Plant Breeding Institute de Cambridge). A la floraison (plus précisément lors de l'apparition des étamines), on détermine sur le matériel frais et par talle les caractères indiqués au tableau 1. Les mesures sont exécutées sur cent talles. Nous avons considéré comme sous-développé un épillet dont la dimension est inférieure au tiers de la dimension de l'épillet moyen. Le volume de l'épi est mesuré par immersion dans une burette remplie d'eau, additionnée d'un peu de détergent ; le volume de l'air enfermé dans les glumes et glumelles est inclus. La mesure s'effectue immédiatement après avoir légèrement secoué l'épi sous l'eau. On obtient les surfaces foliaires par planimétrage de photocopies des feuilles. L'observation des nervures se fait à la loupe binoculaire. Une source lumineuse est placée sous la feuille. On observe les nervures longitudinales, visibles grâce au massif fibreux ; elles apparaissent jaunâtres. Le comptage se fait à mi-longueur. Tous les poids secs sont obtenus après séchage (48 h à 95°) en étuve ventilée, et refroidissement des échantillons en dessicateurs contenant du silicagel. La raison de l'observation des surfaces foliaires est évidente : il s'agit d'étudier les surfaces photosynthétiques responsables de la formation de l'épi. L'observation du nombre de veines et de la largeur des feuilles nous donne une mesure grossière des voies de transport. La densité des veines (nombre de veines/largeur de la feuille) permet de séparer dans une certaine mesure dans le caractère « nombre de veines » ce qui est relatif à la largeur des feuilles et ce qui est relatif à la disposition des veines elles-mêmes. Les masses surfaciques ont souvent été citées (voir discussion) comme des paramètres liés à la capacité photosynthétique de la feuille.

Le rapport du poids sec de la dernière gaine à sa longueur (densité de la gaine) donne une mesure du développement en épaisseur de la gaine, faisant abstraction de

TABLEAU 1

Caractères étudiés et symboles
Characters studied and symbols used

EPI (*ear*) poids de l'épi E (*ear dry weight*)

Volume de l'épi Vol (*ear volume*)

Longueur de l'épi LE (*ear length*) → densités des épillets ED(= NEp1/LE) (*spikelet density*)

Nombre d'épillets (*number of spikelets*) → Normaux (*normal*) NEp1

→ sous développés NEp2 (*underdevelopped*)

FEUILLES ET TIGE (caractères végétatifs) (*leaves and stem ((vegetative characters))*)

a) **longueurs de la tige** (sans épi) (*stem length (without ear)*)

longueur totale LT (*total length*) → LS portion supérieure (du dernier nœud à la base de l'épi) (*upper part from last node to ear collar*))

→ LB portion inférieure (*low part*)

b) **poids** (*dry weights*)

poids total de la talle sans l'épi PST (*total shoot weight (without ear)*)

feuilles (1)	gaines foliaires (1)	portions de tige (1)	partie sommitale (1)	partie basale sous le second nœud, sans F3
F1, F2, F3	G1, G2	T1, T2	NO1 = F1 + F1 + G1	B
(*leaf laminae*)	(*sheaths*)	(*stems sections*)	(*upper parts*)	(*lower parts underneath second uppermost node without F3*)

c) **surfaces et paramètres foliaires** (*leaf characters and areas*)

poids foliaires (*leaf weights*)

A1, A2, A3 surface (1) (*area*) → masse surfacique | SLW1, SLW2, SLW3 (F/A) (*specific leaf weights*)

L1, L2, L3 longueur (1) (*length*)

l1, l2, l3 largeur maximale (1) (*maximal width*)

densité des nervures | ND1, ND2 (= ND/1) (*vein density*)

NE1, NE2 nombre de nervures (*number of veins*)

G1L longueur de la dernière gaine (1) (*flag sheath length*)

DG rapport G1/G1L (*ratio G1/G1L*)

---

(1) La numérotation est faite à partir du sommet.
Les unités de mesure sont les suivantes : poids en mg ; longueurs en mm ; surfaces foliaires en mm^2.
(*Numbering starting at op. Units : weights in mg ; length in mm ; areas in* mm^2).

l'effet de sa longueur sur son poids. Les différents paramètres de longueur sont des mesures, à la fois de la taille des divers organes de la talle et des distances que doivent parcourir les assimilats pour passer d'un organe à l'autre.

2. — *Analyse statistique*

Comme précédemment, le but essentiel poursuivi dans l'analyse des résultats est de classer les caractères étudiés selon leur relation plus ou moins étroite avec des paramètres considérés comme primordiaux. Dans ce cas-ci, ces derniers sont le poids sec de l'épi ou son volume, ainsi que le nombre d'épillets fertiles. Les quatre méthodes utilisées ont été décrites précédemment, et sont les suivantes :

2.1. — Classement des caractères morphologiques par ordre décroissant de la valeur absolue de leur coefficient de corrélation avec les critères primordiaux.

2.2. — Classement selon leur ordre d'inclusion dans une équation de prédiction du rendement par la méthode de régression pas à pas. Cette méthode a été utilisée pour classer l'ensemble de tous les caractères, et ensuite uniquement l'ensemble des caractères végétatifs (non relatifs à l'épi). Les caractères relatifs au poids sec des tiges T1 et T2, ainsi qu'à la longueur du pédoncule LS ne sont cependant pas inclus dans ces régressions. Seuls les caractères liés significativement à la variable expliquée sont classés.

2.3. — Une troisième méthode a consisté à calculer une série de régressions multiples usuelles impliquant seulement certains groupes de même nature, qu'on exprime dans les mêmes unités ; par exemple, les surfaces foliaires des trois dernières feuilles ; le nombre de nervures de chacune des deux dernières feuilles ; les « masses surfaciques » ; les poids secs des parties sommitales (feuille, gaine, tige), etc... Les variables expliquées sont les caractères primordiaux, et surtout le poids sec de l'épi. Ainsi, on peut classer les groupes de variables explicatives d'après la précision de la prédiction qu'elles permettent de fonder (coefficient de corrélation multiple). Il est également possible, à l'intérieur de chaque groupe, de classer les caractères d'après leur lien avec le critère primordial considéré (valeur absolue des corrélations partielles), en tenant compte des interrelations entre les autres variables explicatives figurant aussi dans l'équation de régression.

2.4. — Comme les méthodes précédentes ne permettent pas de tenir compte des interrelations complexes entre l'ensemble des variables, on a soumis la matrice des coefficients de corrélation à une analyse factorielle. On a utilisé la méthode des facteurs principaux pour la détermination des saturations. Les facteurs extraits (en fait, la moitié d'entre eux) ont été soumis à des rotations orthogonales selon la méthode varimax. Le classement des caractères morphologiques se fait d'après la valeur absolue de leur saturation dans un facteur qui peut être considéré comme un facteur de rendement. Rappelons en simplifiant quelque peu que les saturations indiquent la part d'intervention de chaque variable originale dans la composition de chaque facteur.

C'est l'examen des saturations qui permet l'interprétation de la signification des facteurs. Un exemple : si le poids sec de l'épi ou le nombre d'épillets montre une satu-

ration élevée dans un seul des facteurs extraits de la matrice des corrélations, ce dernier peut être considéré comme un facteur de rendement.

Nous renvoyons le lecteur à la première partie de ce travail pour une brève discussion du choix des méthodes qui présentent toutes des imperfections, mais se complètent mutuellement. La terminologie employée est celle de Dagnelie (1975).

Résultats

1. — *Coefficients de variation*

Comme il est bon de connaître la variabilité des caractères observés, nous avons classé grossièrement les principaux d'entre eux selon leur coefficient de variation :

$$CV = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}} \qquad \sigma = \text{écart type} \; ; \quad \bar{x} = \text{moyenne}.$$

groupe 1. CV de 5 à 10 p. 100
1, 2, 3 ; I1, 2 ; NE1 ; G1L, NEp1, ND1

groupe 2. CV de 11 à 15 p. 100
A2, A3, NE2, ND2, SLW1, SLW2, SLW3

groupe 3. CV de 16 à 20 p. 100
A1, G1, B, PST, F2, F3, PS1, DG

groupe 4. CV de 21 à 25 p. 100
T1, G2, T2, F1, Vol, E.

Les symboles sont présentés dans le tableau 1.

2. — *Corrélation simple*

Il est extrêmement difficile de résumer les matrices de corrélations. En effet, tout comme nous l'avions observé dans la première partie de cette étude, le nombre de coefficients statistiquement significatifs est tel qu'il est impossible de les présenter tous. Les graphes de corrélation que nous présentons dans la figure 1 seront ainsi limités arbitrairement aux coefficients de corrélation supérieurs à 0,8 en valeur absolue. On notera que la valeur critique du coefficient de corrélation est de 0,257 et de 0,324 aux niveaux $p = 0{,}01$ et 0,001 respectivement. La valeur critique choisie, 0,8, correspond à un niveau de l'ordre de 10^{-40}. Les relations avec les caractères que nous considérons comme essentiels (poids sec de l'épi, nombre d'épillets) ne sont pas présentées dans cette figure (avec l'exception du graphe n° 4). Elles apparaissent en effet dans le tableau 2. Pour la facilité, on a décomposé les graphes de corrélation en graphes regroupant des variables du même type, et par conséquent plus susceptibles *a priori* d'être liées. Les relations entre variables de groupes différents sont reprises dans un dernier graphe. Pour le cultivar Maris Nimrod, le nombre de corrélations supérieures à 0,8 est plus faible que chez tous les autres cultivars. Les graphes de la figure 1 sont présentés à titre documentaire.

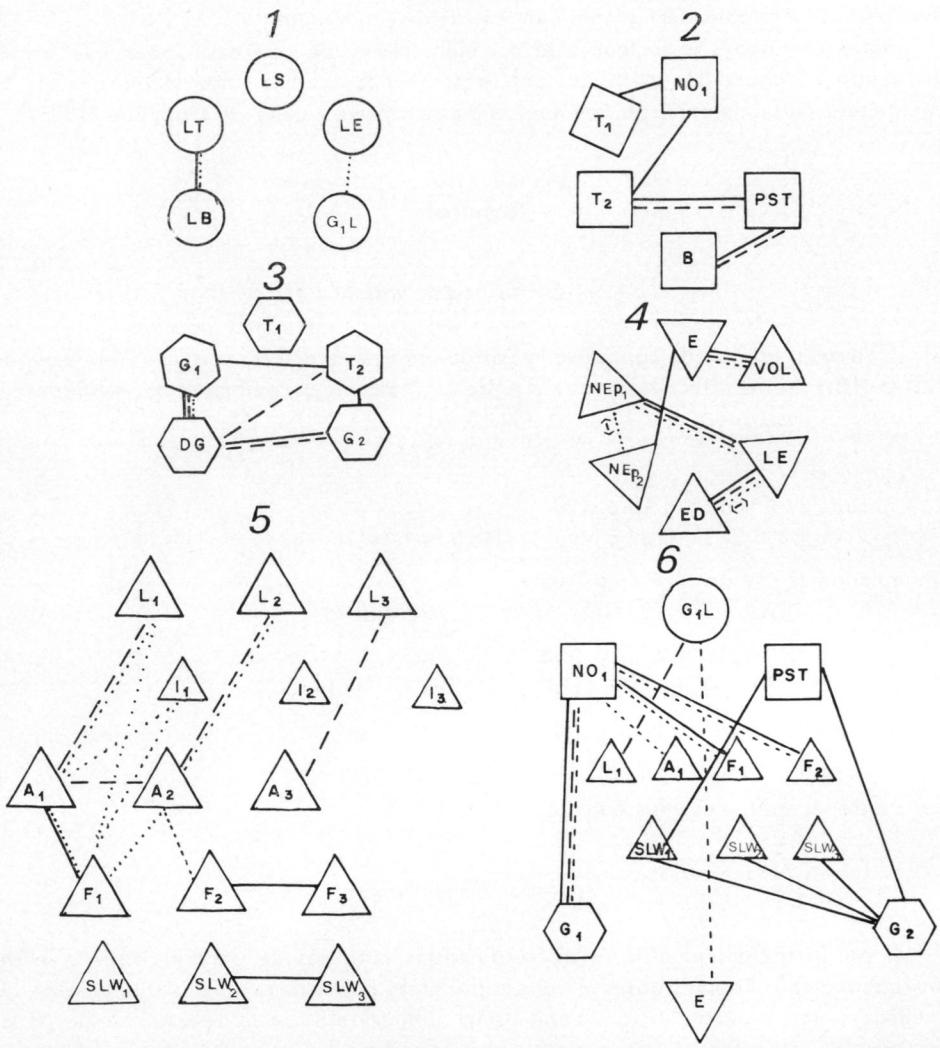


FIG. 1. — *Graphes de corrélations entre caractères morphologiques*

Seules les relations correspondant à $|r| > 0{,}8$ sont présentées ; — Cama, — — — Maris Nimrod, ... Norda.

Les variables de même type sont d'abord regroupées au sein de graphes séparés. Graphe 1 : longueurs ; graphe 2 : poids secs (sauf feuilles) ; graphe 3 : parties sommitales (sauf feuilles) ; graphe 4 : caractères de l'épi ; graphe 5 : caractères foliaires (des limbes).

Le graphe 6 présente toutes les relations (avec $|r| > 0{,}8$) entre variables de groupes différents. Les relations entre poids de l'épi ou nombre d'épillets d'une part, et caractères végétatifs d'autre part, ne sont pas présentées. Voir les symboles au tableau 1.

Relations between morphological characters.

Only the relations corresponding to $|r| > 0.8$ are presented. Variables ot the same type are grouped separately (graphs 1 to 5). Graph 6 presents relations (with $|r| > 0.8$) between variables belonging to different groups. Relations with ear weight or spikelets number are not presented.

En effet, l'ensemble de la matrice sera étudiée au moyen de l'analyse factorielle. Par étude directe des coefficients de corrélation, nous n'aborderons que les relations avec les caractères de rendement, à savoir le poids sec de l'épi et le nombre d'épillets normalement développés.

Les coefficients de corrélation avec les caractères de rendement sont présentés en détail dans le tableau 2. Pour éviter de surcharger le tableau, nous y avons fait figurer les caractères morphologiques les mieux corrélés aux caractères considérés comme caractères de rendement. Le classement des coefficients de corrélation d'après leur valeur absolue est indiqué entre parenthèses. Ce classement est basé sur l'ensemble des caractères morphologiques, et pas uniquement sur ceux présentés au tableau 2.

TABLEAU 2

Coefficients de corrélation simple (significatifs au niveau p = 0,01), *à la floraison* (1)

Correlation coefficients (simple correlation) significant at the level p = 0.01, *at anthesis* (1)

Caractères de l'épi	E			NEp1		
	Cama	Maris Nimrod	Norda	Cama	Maris Nimrod	Norda
Vol	0,940 (1)	0,933 (1)	0,923 (1)	0,758 (2)	0,749 (2)	0,763 (3)
NEp1	0,758 (12)	0,730 (9)	0,665 (10)			
Nep2	— 0,833 (6)	— 0,738 (8)	— 0,770 (6)	— 0,735 (3)	— 0,714 (3)	— 0,824 (2)
LE	0,622 (19)	0,668 (10)	0,617 (13)	0,810 (1)	0,829 (1)	0,844 (1)
ED	— 0,627 (18)	— 0,583 (25)	— 0,654 (11)	— 0.560 (9)	— 0,523 (9)	— 0,626 (7)
Caractères végétatifs						
a) longueurs						
LT	—	—	—	—	—	0,344 (27)
b) poids secs						
PST	0,886 (3)	0,792 (5)	0,778 (4)	0,634 (7)	0,540 (8)	0,671 (5)
F1	0,631 (17)	0,325 (36)	0,604 (14)	0,524 (13)	0,351 (22)	0,589 (10)
F2	0,847 (5)	0,443 (30)	0,773 (5)	0,666 (5)	0,373 (21)	0,644 (5)
F3	0,793 (10)	0,335 (34)	0,732 (8)	0,689 (4)	—	
G1	0,816 (7)	0,833 (3)	0,603 (15)	0,527 (12)	0,589 (4)	0,594 (13)
T1	0,684 (16)	0,585 (11)	0,703 (9)	0,468 (17)	0,477 (12)	0,474 (19)
T2	0,862 (4)	0,864 (2)	0,783 (2)	0,586 (8)	0,456 (7)	0,477 (18)
c) surface et autres paramètres foliaires						
A1	—	0,402 (31)	0,434 (25)	—	0,500 (10)	0,481 (16)
A2	—	—	0,561 (17)	0,435 (21)	0,446 (13)	0,570 (11)
A3	0,353 (25)	—	—	0,500 (16)	—	0,563 (12)
ND1	—	—	—	—	— 0,390 (20)	— 0,332 (29)
ND2	—	—	—	—	— 0,404 (18)	—
SLW1	0,912 (2)	—	0,779 (3)	0,637 (6)	—	0,612 (8)
SLW2	0,814 (9)	—	0,653 (12)	0,451 (19)	—	0,388 (24)
SWL3	0,734 (13)	—	0,554 (18)	0,404 (23)	—	0,426 (21)
DG	0,728 (14)	0,777 (7)	0,549 (19)	0,373 (24)	0,417 (17)	0,393 (23)

(1) Pour les symboles utilisés, voir tableau 1 ; seuls les coefficients significatifs au niveau p = 0,01 sont présentés. Les chiffres entre parenthèses correspondent au classement des coefficients de corrélation d'après leur valeur absolue, dans chaque colonne. Ce classement ne doit pas être pris à la lettre, l'ordre pouvant changer dans une certaine mesure du seul fait du hasard.

(See symbols in table 1 ; only significant (p = 0.01) coefficients are presented. Number in parenthesis correspond to the rank (ranking according to absolute value of coefficient).

a) *Corrélations avec le poids sec de l'épi.*

Une remarque préalable s'impose : les gaines foliaires (poids secs ou rapport poids sec/longueur) sont mieux corrélées au poids de l'épi que les surfaces foliaires correspondantes. Il en va de même pour les poids secs foliaires. Pour le cultivar Cama, on note une meilleure corrélation entre l'épi et les deuxième et troisième feuilles, qu'entre la première feuille (poids sec ou surface) et l'épi. La même chose apparaît pour Norda, mais pas pour Maris Nimrod (tabl. 2). La « masse surfacique » (specific leaf weight) de la dernière feuille paraît particulièrement liée au poids de l'épi chez les cultivars Cama et Norda. Si une bonne corrélation apparaît entre le poids sec total (sans l'épi) et celui de l'épi — ce qui montre nettement que les talles bien développées portent les plus beaux épis —, on notera cependant que ces talles ne sont pas les plus longues (corrélation négative ou (et) non significative avec la longueur). Un chaume très solide (poids sec T2, T1, B, mais particulièrement T2) semble être caractéristique des talles bien fournies en épis.

On soulignera aussi l'évidente corrélation négative entre le nombre d'épillets stériles et le poids de l'épi.

Le lien étroit entre poids sec et volume de l'épi montre que la mesure pondérale équivaut à celle de la taille de l'épi.

Nombre et densité des veines ne semblent pas être des caractères marquants ; en outre, les corrélations entre épi et densité de veines sont négatives.

b) *Corrélation avec le nombre d'épillets.*

Chez les trois variétés — mais d'une façon moins marquée chez Cama —, il existe une bonne corrélation entre la longueur de la dernière gaine et le nombre d'épillets fertiles. De nouveau, les deuxième et troisième feuilles (à partir du sommet) sont mieux corrélées que la première. L'importance du nombre d'épillets stériles est nette (corrélation négative) ; il en va de même pour la longueur de l'épi qui domine tous les autres caractères. La densité des nervures est liée négativement au nombre d'épillets chez Maris Nimrod et Norda (non significative chez Cama).

3. — *Régressions pas à pas*

Les régressions pas à pas (variable expliquée : poids sec de l'épi ; tabl. 3) soulignent l'importance de la « masse surfacique » (sauf chez Maris Nimrod), du poids sec total et de celui de la dernière gaine. Lorsqu'on prend en considération uniquement les caractères végétatifs comme variables explicatives, la prédominance des gaines sur les poids secs ou les surfaces foliaires apparaît nettement. Une constatation frappante : la première feuille (surface ou poids) n'apparaît pas souvent dans les équations, sa contribution à l'ajustement n'étant pas statistiquement significative ($p = 0{,}05$).

Lorsque le nombre d'épillets fertiles représente la variable à expliquer (tabl. 3), la troisième feuille (poids) joue un rôle prépondérant. Chez Maris Nimrod cependant, les gaines dominent toujours. La densité des cordons conducteurs (nervure) apparaît une fois dans l'équation finale ; mais de nouveau, la relation est négative.

TABLEAU 3

Ordre d'inclusion des différents caractères dans l'équation de régression pas à pas sur les caractères végétatifs (P = 0,05), *signe de leur coefficient de régression dans l'équation finale, et coefficient de corrélation multiple R* [1]

Order of entrance of the different characters in the regression equation (stepwise regression with vegetative characters as independent variables), sign of regression coefficient in the final equation, and multiple correlation R [1]. Dependent variable is ear dry weight at anthesis (first series of equations) and number of fertile spikelets (second series of equations)

Variables à expliquer : poids de l'épi à la floraison							
Cama	DG	I1	F3	SLW2	F1		R = 0,959
	+	+	+	+	+		
Maris Nimrod....	G1	PST	LT	ND1	DG	L1	R = 0,938
	+	+	+	—	—	—	
Norda	SLW1	PST	SLW2	DG	F3	LT	R = 0,897
	+	+	+	+	+	—	
Variables à expliquer : nombre d'épillets fertiles							
Cama	F3	SLW1	ND1				R = 0,731
	+	+	—				
Maris Nimrod....	G1	DG	PST	I3	A2		R = 0,784
	+	—	+	+	—		
Norda	F3	PST					R = 0,772
	+	+					

(1) Voir les symboles au tableau 1.

(See symbols in table 1.)

4. — *Régressions multiples*

Le tableau 4 présente les résultats relatifs aux diverses régressions multiples. Les surfaces foliaires des trois dernières feuilles rendent moins bien compte de la variabilité du poids de l'épi que leur masse spécifique ou les poids secs des parties sommitales (gaine, tige, situées au-dessus du dernier nœud). D'autre part, les relations avec la densité des nervures des deux dernières feuilles ne sont pas significatives.

Une constatation caractéristique cependant : dans l'équation qui implique les surface foliaires (équation 1), seule la troisième feuille est liée significativement à l'épi.

A l'intérieur de chacune des équations, les variables explicatives sont exprimées dans les mêmes unités. Ceci permet de comparer les pentes, et par conséquent de comparer les effets des variations de chacune des variables explicatives sur la variable expliquée. C'est pourquoi les coefficients de régression partielle sont également présentés dans le tableau 4, bien que le but ne soit pas de discuter des équations de prédiction.

On remarquera que les mêmes conclusions sont valables aussi bien pour l'intensité du lien (corrélation partielle) que l'importance (pente ou coefficient de régression partielle) ; les classements des caractères morphologiques d'après la valeur absolue de ces coefficients (corrélation ou régression) sont très semblables.

TABLEAU 4

Régressions multiples avec E (poids de l'épi comme variable à expliquer) (1)

Multiple regressions with E (*ear dry weight at anthesis*) *as dependent variable.*
The second column indicates the independent variables in the equation ; partial correlations are in column 4 to 6, and partial regressions in column 7 to 9

Equation	Variables explicatives	Variété	Corrélations partielles (2)			Régressions partielles (3)			Corrélation multiple R
1	A1, A2, A3	Cama	0,140	— 0,001	0,209 *	4,1	0,40	8,4	0,388
		M. N. (4)	0,183	0,128	— 0,207 *	0,7	0,8	— 0,9	0,445
		Norda	— 0,046	0,317 **	0,090	— 1,0	0,14	4,0	0,567
2	NE1, NE2	Cama	0,127	0,424 **		5,1	38		0,529
		M. N.	0,088	0,138		4,4	14		0,222
		Norda	0,271 **	0,195		15	17		0,384
3	F1, F2, F3	Cama	— 0,018	0,399 **	0,228 *	— 0,64	31	15	0,735
		M. N.	— 0,046	0,254 **	0,080	— 2,7	22	6,0	0,451
		Norda	— 0,106	0,453 **	0,365 **	— 3,8	29	26	0,807
4	SLW1, SLW2, SLW3	Cama	0,744 **	0,309 **	— 0,038	21	5,8	— 0,65	0,853
		M. N.	— 0,345 **	0,251 *	0,249	— 8,0	9,1	6,1	0,459
		Norda	0,627 **	0,277 **	0,185	2,3	2,5	2,1	0,822
5	G1, T1, F1	Cama	0,628 **	0,282 **	— 0,058	18	5,0	— 2,1	0,696
		M. N.	0,791 **	0,466 **	— 0,183	19	5,3	— 4,0	0,874
		Norda	0,321 **	0,483 **	— 0,006	7,2	9,0	— 0,25	0,750
6	ND1, ND2	Cama	— 0,120	0,084		— 9,7	12		0,016
		M. N.	— 0,179	— 0,181		— 1,6	— 3,1		0,314
		Norda	— 0,167	— 0,113		— 1,6	— 1,5		0,248

(1) Voir les symboles au tableau 1.
(See symbols in table 1.)
(2) Les coefficients sont dans l'ordre correspondant à celui des variables explicatives.
(Coefficients are in the same order as the dependent variables in column 2.)
(3) Les coefficients de régression sont exprimés en unités arbitraires (mais homogènes au sein de chaque groupe d'équations) suite à la multiplication par une constante (différente d'un groupe à l'autre).
(Regression coefficients are in arbitrary units (but the same scale is used within each set of equations).
(4) M. N. = Maris Nimrod.

5. — *Analyse factorielle*

L'analyse factorielle fait apparaître dans chaque cas un facteur rendement bien marqué. Le poids sec de l'épi E, et, dans une moindre mesure, le nombre d'épillets, révèlent une saturation nettement élevée dans un seul facteur.

On note les saturations de ces deux caractères dans chacun des quatre premiers facteurs (tabl. 5). L'importance de chaque variable originale sur la détermination du rendement se mesurera par la valeur absolue de leur saturation dans le facteur rendement.

TABLEAU 5

Saturation des caractères de rendement dans les quatre premiers facteurs issus de la factorisation de la matrice des coefficients de corrélation (1)

Loadings of yield characters in the first four factors extracted from the correlation matrix (1)

Cultivar	Caractère (1)	1	2	3	4
Cama	E	0,911	— 0,125	— 0,134	0,007
	Vol	0,829	— 0,248	— 0,215	— 0,036
	NEp1	0,580	— 0,149	— 0,255	— 0,053
Maris Nimrod	E	0,857	— 0,149	0,069	— 0,073
	Vol	0,780	— 0,208	0,046	— 0,083
	NEp1	0,524	— 0,289	— 0,012	— 0,099
Norda	E	0,206	0,846	— 0,077	— 0,005
	Vol	0,313	0,790	0,037	0,005
	NEp1	0,229	0,556	0,155	— 0,033

(1) Voir les symboles au tableau 1.
(See symbols in table 1.)

Ainsi, on peut classer les caractères morphologiques (variables originales) selon la valeur absolue de leur saturation dans le facteur rendement.

Ce dernier prend, soit la première place (Cama, Maris Nimrod), soit la seconde (Norda) ; c'est par conséquent un des facteurs qui révèle la plus grande partie de la variabilité totale des données. La proportion de la variance totale expliquée par le facteur rendement est de 0,420 pour Cama, 0,355 pour Maris Nimrod. Ceci montre le lien entre l'épi et l'ensemble des caractères morphologiques de la plante. Les saturations des caractères morphologiques sont représentées dans le plan des deux premiers facteurs extraits dans la figure 2. Pour éviter de surcharger les figures, on n'y a représenté que les caractères morphologiques ayant une saturation $> 0{,}2$ en valeur absolue, dans le facteur rendement. Pour obtenir une présentation homogène, les saturations du facteur 1 de Norda ont été multipliées par — 1. L'examen du classement des caractères morphologiques selon leur importance pour le rendement (valeur absolue de leur saturation dans le facteur rendement ou pratiquement valeur absolue

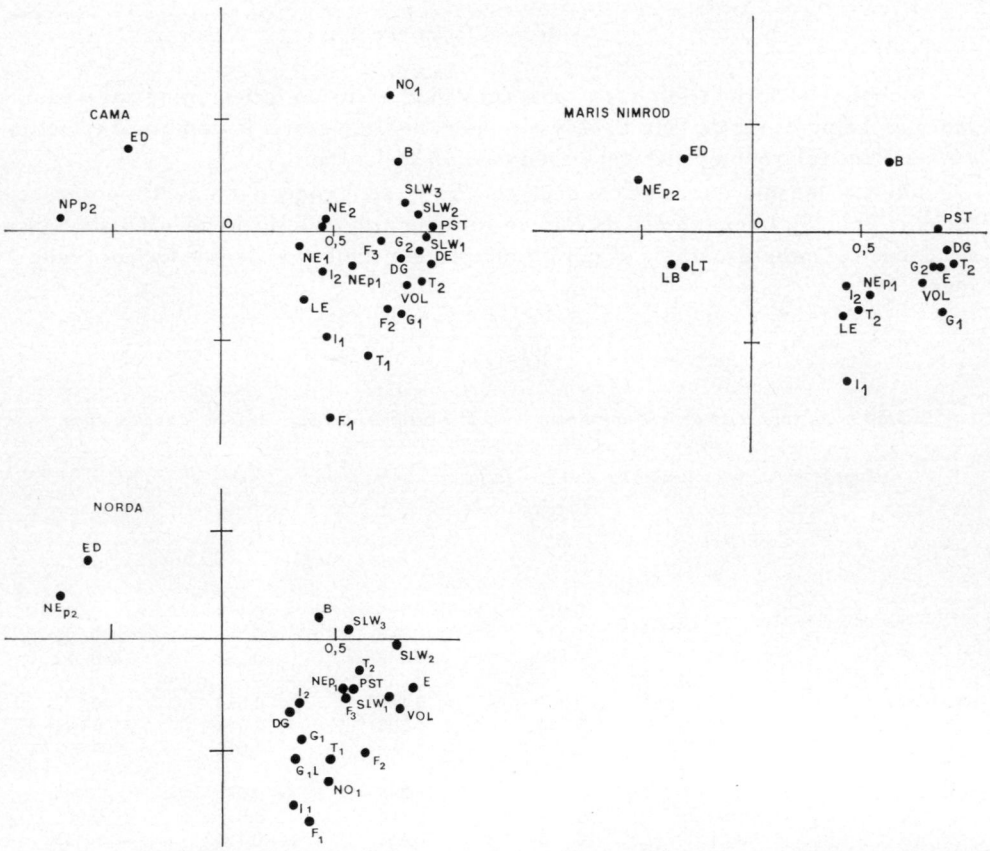


FIG. 2. — *Représentation des saturations des caractères morphologiques dans le plan formé par les deux premiers facteurs extraits de la matrice de corrélation.* Les saturations dans le facteur rendement sont portées en abscisses. Seuls les caractères morphologiques ayant une saturation > 0,3 (en valeur absolue) dans le facteur rendement sont présentés. Pour les symboles, voir tableau 1. Proportion de la variance totale expliquée par le premier facteur, et par les deux premiers facteurs respectivement : 0,4 et 0,6 pour Cama, 0,4 et 0,6 pour Maris Nimrod, et 0,5 et 0,6 pour Norda.

Representation of loadings of morphological characters in the plane formed by the two first factors extracted from the correlation matrix. Abscissa corresponds to yield factor. Only loading > 0.3 (in absolute value) are presented. See symbols in table 1.
Proportion of total variance accounted for by the first factor, and the two first factors respectively 0.4 and 0.6 (Cama), and Maris Nimrod, 0.5 ond 0.6 (Norda).

des abscisses dans la figure 2) confirme dans l'ensemble les résultats des autres analyses :

— Importance de la « masse surfacique » des deux dernières feuilles chez Cama et Norda ;

— Importance des gaines foliaires (G1, G2, G1/G1L) chez Cama et Maris Nimrod ;

— Importance du poids sec total (sans épi) de la talle ;

— Meilleurs liens entre épi et poids sec foliaire, qu'entre épi et surface foliaire ;

— Prédominance de la deuxième ou troisième feuille sur la première (poids sec) pour les relations avec l'épi ;

— Influence néfaste de la présence d'épillets sous-développés (Nep2) et d'épis trop denses (saturation négative).

Si l'un des deux facteurs présentés dans la figure 2 est typiquement un facteur rendement, l'autre peut être interprété comme un facteur « surface foliaire », ou plus précisément « surface de la dernière feuille ». En effet, pour les trois cultivars, les caractères présentant les saturations les plus élevées (en valeur absolue) dans ce facteur sont respectivement la longueur et la surface foliaire de la dernière feuille (saturation en valeur absolue $> 0,9$). Quelques autres caractères seulement ont des saturations supérieures à 0,5 (en valeur absolue) : A2 et G1L sont les seuls dans ce cas pour les trois cultivars.

L'existence de ce facteur orthogonal au facteur rendement confirme bien le faible lien entre surface de la dernière feuille, d'une part, et rendement d'autre part. Notons que ce résultat est assez général. On retrouve en effet la présence de ces deux facteurs dans des études intervariétales (Ledent, 1979).

Discussion et conclusions

L'interprétation de ce genre de résultats (analyse statistique des relations entre une série de caractères aléatoires, tous liés entre eux) constitue toujours une entreprise délicate, quelle que soit la méthode utilisée. Néanmoins, certains résultats apparaissent d'une façon claire et générale :

— la prédominance des gaines sur les feuilles revêt un caractère marquant au moment de la floraison. Une relation étroite unit la taille de l'épi et la gaine de la dernière feuille.

En outre, à la floraison, les feuilles situées juste au-dessous de la feuille sommitale sont plus étroitement liées aux variations de la taille de l'épi que la dernière feuille.

Au moment de son développement rapide à l'intérieur des gaines des dernières feuilles, l'épi dépend des assimilats secrétés par les limbes des feuilles déjà formées et actives. Au début, la dernière feuille continue à se développer et ne fonctionne pas encore totalement, ce qui peut expliquer les relations observées. Comme signalé précédemment (Ledent, 1977*a*), le rôle de la dernière gaine pourrait aussi se comprendre par la protection qu'elle assure au jeune épi en formation ; ou plus probablement encore par le développement presque simultané de ces deux organes qui sont dès lors soumis aux mêmes aléas.

Ces résultats confirment ce qui avait été entrevu dans une étude précédente (Ledent, 1974 ; Ledent et Moss, 1979) précisant les liens observés à la maturité et discutés dans le premier volet de ce travail (Ledent, 1977*a*).

Là aussi, les gaines étaient mieux liées au rendement que les feuilles. De même, les deuxième et troisième feuilles étaient en relation plus étroite avec le rendement que les feuilles sommitales. Maintenant, il est tout à fait clair que cette relation observée à maturité n'est nullement expliquée par le poids des grains. En effet, à la floraison, quand les futurs grains ne représentent qu'une part tout à fait négligeable du poids de l'épi, des relations similaires sont observées. Ces relations sont donc bien le résultat de liens établis longtemps avant la floraison. Des résultats récents obtenus sur blés cultivés en atmosphère enrichie en CO_2 (Fischer et Aguilar, 1976) montrent d'ailleurs que le rendement est plus sensible aux limites imposées par la capacité photosynthé-

tique de la plante durant la période de 2 mois précédant le remplissage du grain. En outre, les effets limitants se font sentir essentiellement sur le nombre de grains. Ces résultats correspondent très bien aux nôtres.

Il est évident que c'est une erreur d'ignorer la période précédant la floraison pour justifier les variations de rendement, même s'il ne s'agit que de rendement par épi. Certaines composantes du rendement comme le nombre d'épillets, et divers caractères importants tels que les dimensions, le volume de l'épi, sont déterminés au cours de cette phase, au cours de laquelle la dernière feuille ne peut jouer qu'un rôle négligeable ou nul.

La différence de poids (sans l'épi) — et non la taille uniquement — marque le mieux la compétition entre talles. Ainsi, les talles les plus avantagées (gros épis) forment aussi les chaumes les plus vigoureux (poids sec), surtout sous le dernier nœud.

Contrairement à ce que l'on aurait pu espérer (translocation, relations hydriques), la densité des nervures ne semble pas représenter un facteur marquant, à ce stade de la vie du végétal du moins.

Malgré cette portée relativement secondaire, les corrélations simples sont souvent significatives. L'appréciation assez sommaire somme toute du développement réel des tissus conducteurs entre peut-être en ligne de compte ici.

Une étude plus précise de l'anatomie interne de la feuille (Ledent et Pochet, 1978) confirme ces conclusions. Parmi les caractères anatomiques internes de la feuille, le nombre de cordons est le mieux lié au rendement, mais le lien est faible.

On aurait pu attribuer, en partie au moins, la corrélation des poids secs foliaires meilleure avec l'épi qu'avec les surfaces foliaires, à la mesure moins précise de ces dernières. Une telle interprétation, cependant, ne cadre pas avec les excellentes corrélations trouvées entre l'épi et la « masse surfacique » (poids sec par unité de surface).

On peut considérer que ce paramètre est déterminé par l'épaisseur de la feuille, ou encore par la densité des tissus qui la composent. On a souligné maintes fois dans la littérature (Baldy, 1973 ; Wilson et Cooper, 1967, 1969) l'avantage d'un parenchyme foliaire dense. Selon les auteurs, cette supériorité s'explique par une plus grande concentration de l'appareil photosynthétique (chloroplastes), par une meilleure circulation du CO_2 vers les sites de carboxylation, par une translocation plus aisée des produits élaborés et par la décongestion des sites de synthèse. Il est clair qu'une étude de ce genre ne permet pas de préciser davantage. On notera d'ailleurs que les résultats relatifs à la masse surfacique ne se retrouvent pas dans nos études intervariétales (Ledent, 1977*b*, 1979). L'ensemble des relations mises en évidence dans cette étude intravariétale sont l'expression de la physiologie de la plante telle qu'elle s'exprime à travers la compétition entre talles ou entre plantes, et l'effet des variations locales (sol, humidité...).

On n'a pas fait mention explicitement des effets de densité ; en effet, des travaux précédents (Ledent, 1974) ont montré qu'on atteignait le même genre de conclusions avec des densités très différentes. Les peuplements différaient d'ailleurs relativement peu entre les cultivars. On avait 380 épis/m² pour Maris Nimrod et les peuplements de Cama et Norda étaient supérieurs de 8 p. 100 et de 16 p. 100, respectivement. On n'a pas cherché non plus dans cette étude à mettre en évidence des différences variétales. On s'est attaché essentiellement à discerner les tendances communes qui apparaissaient chez trois cultivars choisis arbitrairement.

Il serait imprudent d'étendre les résultats à l'ensemble de l'espèce, cela va de soi. Les méthodes utilisées s'imposent d'elles-mêmes. Les conclusions dégagées ne peuvent actuellement être étendues hors du cadre précis de l'étude telle qu'elle a été réalisée. Ces limitations ont été discutées plus en détail dans le premier volet de cette étude (Ledent, 1977*a*). On notera cependant que certains des résultats de cette étude essentiellement intravariétale se retrouvent aussi dans le cas de comparaisons intervariétales (Ledent, 1977*b*, 1979).

Quoi qu'il en soit, une chose nous semble claire : tant au niveau des pratiques agronomiques qu'à celui de la sélection, il faudrait apporter une plus grande attention à la période de développement de l'épi qui précède la floraison ; en effet, cette période est cruciale pour le rendement.

Reçu pour publication en janvier 1979.

Remerciements

Nous remercions tout spécialement Madame M. P. Ledent-Delannay, pour sa précieuse collaboration tout au long de ce travail.

Notre reconnaissance s'adresse aussi à MM. Van Loveren et Kempeneers de la Station de Sélection d'Heverlee, grâce à qui cette étude a pu être entreprise.

Enfin, nous exprimons notre cordiale gratitude à Th. Bellefontaine-Delannay, I. Delannay et M. F. Jouret pour leur aide efficace.

Summary

Relationships between culm yield and morphological characters within cultivars of wheat. — Morphological relationships at anthesis.

Relationships between ear dry weight or spikelet on one side, and a series of morphological characters on the other side, are studied in detail, using various statistical procedures (correlation, stepwise regression, multiple regression, factor analysis) within each of three winter wheat cultivars (Cama, Norda, Maris Nimrod). Measurements are carried out on normally developped tillers, chosen at random in the field. The morphological characters considered are dry weight, length, width or area of the culm and its parts (leaf lamina, leaf sheath, stem section). Ear volume, vein number and density on laminae are also considered.

The surface areas of the second and third uppermost leaves are more closely related to spike (dry weight or volume) and spikelet number than the first leaf area. Total culm wieght (without ear), but not culm length, and uppermost sheath dry weight, as well as specific leaf area of the two uppermost leaves are among the characters most closely related to ear (positive relationship).

Vein number or vein density does not appear to be very important in this case.

Zusammenfassung

Untersuchung innerhalb einer Sorte der Beziehungen zwischen dem Ertrag/Ähre und der morphologischen Merkmalen bei Winterweizen (Triticum aestivum *L.*) *Morphologische Beziehungen zur Blutezeit.*

Die zur Blütezeit bestehenden Beziehungen zwischen dem Trockengewicht der Ähren oder der Ährchenzahl einerseits und einer ganzen Reihe von morphologischen Merkmalen anderseits werden bei drei sorten von Winterweizen (Cama, Maris Nimrod und Norda) erörtert und mit verschiedenen Methoden statistischer Analysen untersucht.

Normalerweise entfaltete bestockungstriebe, die auf Feldparzellen zufällig entnommen wurden werden diesen Beobachtungen unterworfen. Die genessenen Merkmale betreffen die Trockengewichte und die Abmessungen (Länge, Breite oder Fläche) der verschiedenen Organe (Blätter, Blat tscheiden Stengelteile) ; das Ährevolumen, die Zahl und die Dichte der Blattrippen auf der Blattspreite werden auch betrachtet. Die Flächen der zweiten order dritten Blätter ab der Spitze Stehen mit dem Ährgewicht und der Ährchenzahl in engerer Beziehung als die Fläche der Spitzenblätter. Das Gesamttrockengewicht des sprosses (ohne Ähre) — und nicht seine Länge —, das der letzten Blattscheide und das spezifische Blattgewicht der Spitzenblätter erscheinen als die am besten an die Ähre (Trockengewicht oder Volumen) gebundenen Merkmale. Die Zahl oder die Dichte der Blattrippen scheinen nicht sehr signifikante Kriterien zu sein.

РЕЗЮМЕ

Междусортовое изучение соотношения между урожайностью на колос и морфологическими характерностями озимой пшеницы (Triticum aestivum L.). Морфологические связи при цветении.

ЛЕДЕН Ж. Ф.

Соотношения существующие во время цветения, между весом сухогоьвещества колоса, или количеством колосков, с одной стороны, и целой серией морфологических характерностей - с другой, рассматривались у трех культиваров озимой пшеницы (Кама, Марис Нимрод и Норда), и детально иЗучались при помощи разных методов статистического анализа.

Нормально развитые побеги кущения, выбиравшиеся случайно в делянках поля, служили об'ектом этих наблюдений. Рассматривались следующие характерности : вес сухого вещества и размеры (длинна, ширина, или поверхность) различных органов (листья, листовые влагалища, отрезки стебля) принимались также во внимание об'ем колоса и количество и густота сети жилок на листовой пластинке.

Поверхности второго и третьего, начиная сверху листа, более тесно связаны с весом колоса и количеством колосков, чем поверхность верхушечных листбов. Общий вес сухого вещества корневого побега (без колоса), но не его длинна, вес последнего влагалища и « поверхностная масса » (specific leaf weight) верхушечных листьев могут рассматриваться как характерности наиболее тесно связанные с колосом (вес сухого вещества, или об'ем). Колнчество жилок и густота их сети на листе, не являются, как кажется, очень достоверными критериями.

Références bibliographiques

BALDY Ch., 1973. Sur l'énergie active en photosynthèse, son utilisation par des graminées au cours de leur développement. *Ann. agron.*, **24** (I), 1-31.

DAGNELIE P., 1975. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Presses agronomiques de Gembloux, 362 p.

FISCHER R. A., AGUILAR M., 1976. Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of carbon dioxide fertilisation. *Agron. J.*, **68** (5) 749-752.

LEDENT J. F., 1974. *Plant geometry, canopy architecture and leaf angle in wheat*. Ph D Thesis. Univ. of Minnesota, St-Paul, 327 p., Univ. Micro-films. Ann. Arbor. Mich. (Diss. Abstr. 74 : 17).

— 1977*a*. Relations entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité chez diverses variétés de blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.). *Ann. agron.*, **28** (4), 391-407.

— 1977*b*. Relationships between culm yield and morphological characters in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Cereal Research Communications*, **5** (2), 89-99.

— 1979. Relationships between grain yield and morphological characters in the winter wheat-genotypes of the Belgian national list. *Biologia Plantarum* (sous presse).

— POCHET P., 1978. Leaf anatomy and yield in winter wheat cultivars. *Cereal Research Communications*, **6** (3), 255, 264.

— MOSS D. N., 1979. The relation of morphological characters and sheet yield in wheat. *Crop Sci* (sous presse).

WILSON D., COOPER J., 1967. Assimilation of Lolium in Relation to Leaf Mesophyll. *Nature*, **214** 989-992.

— 1969. Apparent photosynthesis and leaf characters in relation to leaf position and age, amoung contrasting Lolium genotypes. *New Phytol.*, **68**, 654-655.

Ann. agro., 1978, **29.**

Table des matières de l'année 1978

J. P. ANDRÉ. — Prévision des équilibres d'échange entre quatre cations dans un substrat de tourbe de sphaignes 541

A. BAILLE, R. GUICHERD, Marie MERMIER. — Le pyranomètre sélectif : étude de ses possibilités d'utilisation dans le domaine agronomique et dans celui de la pollution atmosphérique .. 59

Ch. M. BALDY. — Utilisation d'une relation simple entre le bac classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'ETP en zone soudano-sahélienne 439

J. L. BALLIF. — Porosité de la craie. Appréciation de la taille et de la répartition des pores 123

R. BLANCHET, N. GELFI. — Relations entre développement foliaire, transpiration et production chez le soja (cv Amsoy 71 et Hodgson) 223

Ph. BUSSIÈRES. — Loi de variation du pH d'un sol acide après apport de particules calcaires de caractéristiques différentes 559

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE, F. A. DAUDET. — Oscillations journalières de la profondeur des nappes en l'absence de précipitations 111

G. CALLOT, H. CHAMAYOU, M. DUPUIS. — Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relation avec la dynamique de l'eau. Eléments d'analyse d'un système carbonaté 37

J. L. CHARPENTEAU, J. P. RELLIER. — Essai d'une méthodologie d'étude de l'évolution de quelques caractéristiques de la couche arable sur un dispositif expérimental avec rotations 381

P. CHASSIN, Brigitte LE BERRE. — Mesure de l'aire de la surface totale des argiles avec l'éthanediol. Protocole expérimental et méthode de calcul 311

C. DUTHION. — Composition en acides organiques des racines de plantes soumises à une période d'excès d'eau à différents stades de végétation 169

P. GAILLARDON, R. CALVET, Elisabeth ROUGETET, J. C. GAUDRY. — Etudes préliminaires du rôle de la nature des matières organiques dans les phénomènes d'adsorption des herbicides 243

Agnès HUBERT. — *Etude bibliographique.* — Relations entre la conductivité hydraulique et la structure des milieux poreux 475

B. ITIER, A. PERRIER, G. GOSSE. — Présentation d'une étude analytique de l'advection. III. — Vérification expérimentale du modèle 209

G. LACAZEDIEU, Ph. MALAURENT. — Mesure de l'évapotranspiration. Méthode et critiques .. 79

J. F. LEDENT. — Etude intravariétale des relations entre le rendement par épi et les caractères morphologiques chez le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) : relations morphologiques à la floraison 625

J. P. LEGROS. — *Etude bibliographique.* — Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I. — Précision dans la délimitation des sols 499

J. P. LEGROS. — *Etude bibliographique.* — Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. — Précision dans la caractérisation des unités de sols 583

J. J. LONGUENESSE. — *Etude bibliographique.* — Température nocturne et photosynthèse. ... 525

H. METTAUER, Y. TUAL, R. HAEFLINGER, A. P. CONESA, R. TRENDEL. — Influence des propriétés physiques et mécaniques du sol sur la morphologie et le rendement en racines de la betterave à sucre 147

H. METTAUER. — Contribution à l'étude des potentialités climatiques du Massif Vosgien 603

F. de MONTARD, L. GACHON. — Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. I. — Application de l'analyse factorielle des correspondances à l'analyse de la végétation 277

F. de MONTARD, L. GACHON. — Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité des pâturages d'altitude des Monts Dore. II. — Répartition et extension géographique des faciès de végétation pastoraux 405

R. MOREL. — Quelques aspects nouveaux de la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol 357

A. MORISOT. — Répartition des éléments fertilisants dans les sols de serres florales du midi de la France (œillets et rosiers) 177

Georgette RISSER, P. CORNILLON, J. C. RODE, Magali AUGE. — Effet de la température des racines sur la croissance de jeunes plants de diverses variétés de Melon (*Cucumis melo* L.) .. 453

J. RIVIÈRE. — Etude d'un procédé d'épuration par compostage préalable au cours de la fabrication de pâte à papier 257

J. SERVANT. — Utilisation d'un modèle de désalinisation en sol humide 133

R. SPECTY. — Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. II. — Résultats partiels sur cultures de luzerne 89

Nicole SOUTY. — Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières de sols calcaires 421

D. TESSIER. — Technique d'étude de l'orientation des particules argileuses utilisable sur des échantillons secs ou humides 193

D. TESSIER. — Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation 319

G. VACHAUD, C. DANCETTE, S. SONKO, J. L. THONY. — Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination du bilan hydrique 1

Chroniques de livres 107, 209, 419, 521

Contents of year 1978

J. P. ANDRÉ. — Forecasting the exchange equilibria between four cations in a sphagnum peat medium 541

A. BAILLE, R. GUICHERD, Marie MERMIER. — Study of possibility to use a selective pyranometer in agronomy and atmospheric pollution 59

Ch. M. BALDY. — Use of a simple relation between US class A evaporation pan and Penman's formula to estimate potential evapotranspiration in soudano-sahelian countries 439

J. L. BALLIF. — Chalk porosity. Estimation of the pore size and distribution 123

R. BLANCHET, N. GELFI. — Relations between leaf growth, transpiration and production in soya bean (cv Amsoy 71 and Hodgson) 223

Ph. BUSSIÈRES. — Law ruling pH variations in an acid soil after a supply of limestone particles with different characteristics 559

J. CALLÈDE, M. HALLAIRE, F. A. DAUDET. — Diurnal oscillations of the water table level during dry periods 111

G. CALLOT, H. CHAMAYOU, M. DUPUIS. — Variations of the pH in the solution of calcareous material as related to water dynamics. Data for the analysis of a carbonate system 37

J. L. CHARPENTEAU, J. P. RELLIER. — Experimental methodology for studying the evolution of some characteristics of the surface soil on an experimental system with crop rotations 381

P. CHASSIN, Brigitte LE BERRE. — Measurement of specific area of clay minerals by the ethanediol. Experimental procedure and calculation method 311

C. DUTHION. — Organic acid composition of plant roots subjected to a period of water excess at different vegetative stages 169

P. GAILLARDON, R. CALVET, Elisabeth ROUGETET, J. C. GAUDRY. — Preliminary studies on the part played by the nature of the organic matter in herbicide adsorption phenomenon 243

Agnès HUBERT. — Relationships between the hydraulic conductivity and the structure of porous media (*Bibliographical review*) 475

B. ITIER, A. PERRIER, G. GOSSE. — Analytical study of local advection. III. — Experimental control of the model 209

G. LACAZEDIEU, Ph. MALAURENT. — Measurement of evapotranspiration. Method and reviews 79

J. F. LEDENT. — Relationships between culm yield and morphological characters within cultivars of wheat : Morphological relationships at anthesis 625

J. P. LEGROS. — Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography. I. — Precision in the soil pattern (*Bibliographical review*) 499

J. P. LEGROS. — Search for and numerical checking of the precision in pedological cartography. Bibliographical study. II. — Precision in the characterizing of soil units (*Bibliographical review*) 583

J. J. LONGUENESSE. — Night temperature and photosynthesis (*Bibliographical review*) 525

H. METTAUER, Y. TUAL, R. HAEFLINGER, A. P. CONESA, R. TRENDEL. — Influence of the physical and mechanical properties of the soil on the sugar beet morphology and root yield. 147

H. METTAUER. — Contribution to the study of the climatic potentialities of the Vosgian Mountain 603

F. de MONTARD, L. GACHON. — Studies of ecology and productivity of mountainous pastures in Monts Dore. I. — Vegetation analysis..... 277

F. de MONTARD, L. GACHON. — Ecology of the Monts Dore pastures. II. — Repartition and geographical extension of pastoral facies of vegetation..... 405

R. MOREL. — Some new aspects of carbon and nitrogen dynamics in the soil..... 357

A. MORISOT. — Nutrients distribution in greenhouses soils of the south of France (carnations and roses)..... 177

Georgette RISSER, P. CORNILLON, J. C. RODE, Magali AUGE. — Influence of root temperature on plant growth of various musk-melon cultivars (*Cucumis melo* L.)..... 453

J. RIVIÈRE. — Study of a purification system through a previous compost formation during pulp making process..... 257

J. SERVANT. — Using a desalinization model in saturated soils..... 133

R. SPECTY. — Study of the accumulative effects and after effects of several agronomical factors applied within the framework of rotations possible in the irrigated Hardt region. II. — Incomplete results on lucern crops..... 89

Nicole SOUTY. — First contribution to the study of the specific physical and mechanical characteristics of calcareous soils..... 421

D. TESSIER. — A technique for studying the orientation of the clay particles applicable to dry and moist samples..... 193

D. TESSIER. — Study of the organisation of calcic clays. Evolution during shrinkage..... 319

G. VACHAUD, C. DANCETTE, S. SONKO, J. L. THONY. — Field determination of the hydraulic characteristics of an unsaturated soil. Application on two typical soils of Republic of Senegal with an example to the calculation of the water balance..... 1

Books review..... 107, 209, 419, 521

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 6-1979

Dépôt légal : 2e trimestre 1979. N° d'impression : 26314

CPPAP n° 26017